

# Caracterización de dispositivos avanzados de fibra óptica



Grado en Ingeniería  
en Tecnologías de Telecomunicación

## Trabajo Fin de Grado

Pablo Cabezudo Sánchez-Valverde

Directores:

Rosa Ana Pérez Herrera

Manuel López-Amo Sainz

Pamplona, 18 de junio de 2018

# Abstract

In this work, new advanced optical devices have been studied, both active and passive ones, as well as its behavior after being irradiated with different doses of gamma radiation.

In the first part of this work, several pieces of erbium doped fiber with different radiation doses have been employed as active medium of a fiber ring laser cavity, with the objective of analyzing the effect of gamma irradiation performance over these fibers. Several studies with different setups have been carried out in a way to study and improve a better way to evaluate the radiation dose in these type of fibers.

In the second part, the possibility of develop a random laser using a dispersion compensating fiber as passive component has been experimentally studied. The differences between using a radiated dispersion compensating fiber and non-radiated one have been also compared, showing some promising results.

# Resumen

En este trabajo se han estudiado las propiedades de una serie de dispositivos avanzados de fibra óptica, así como su comportamiento ocasionado por la radiación gamma.

En la primera parte del trabajo se han utilizado diferentes tipos de fibras dopadas con erbio comerciales con distintas dosis de radiación gamma y utilizadas como medio activo en una cavidad láser en anillo con el objetivo de caracterizar el efecto de la radiación en estas fibras.

Además, se han llevado a cabo diferentes montajes que han permitido cuantificar esta radiación con el objetivo de abaratar los sistemas actuales de medición de la radiación en un sistema óptico.

En la segunda parte se ha estudiado la posibilidad de utilizar fibra compensadora de dispersión como elemento pasivo en una cavidad láser lineal con objetivo de desarrollar un láser random. Se han estudiado también las diferencias en la emisión de potencia óptica del láser en el caso en que esta fibra compensadora de dispersión haya sido radiada o no, obteniendo unos resultados muy prometedores.

## Palabras Clave

Fibra dopada con erbio (EDF); láser random; radiación gamma; red de difracción de Bragg (FBG); fibra compensadora de dispersión (DCF).

## Lista de acrónimos

SMF: Fibra monomodo estándar.

MMF: Fibra multimodo estándar.

WDM: Multiplexor por división en longitud de onda.

nm: Nanómetro

MHz: Megaherzio

FBG: Red de difracción de Bragg

Er: Erbio

EDF: Fibra dopada con erbio.

EDFA: Amplificador de fibra dopada con erbio.

ASE: Emisión espontánea amplificada.

OSA: Analizador de espectros ópticos.

Gy: Gray, unidad derivada del SI. Mide la dosis de radiación absorbida.

OBR: Reflectómetro óptico.

mW: milivatio.

mA: miliamperio.

dB/dBm: Decibelio y decibelio de milivatio.

μm: Micrómetro.

DCF: Fibra compensadora de dispersión.

# Índice

1	Fundamentos teóricos.....	8
1.1	Introducción.....	8
1.2	Fibra óptica.....	8
1.2.1	Tipos de fibra.....	9
1.2.2	Limitaciones de la fibra óptica.....	10
1.2.3	Efectos no lineales.....	12
1.3	Dispositivos ópticos.....	13
1.3.1	Aisladores ópticos.....	14
1.3.2	Circuladores.....	15
1.3.3	Multiplexor por división de longitudes de onda....	16
1.3.4	Acopladores ópticos.....	17
1.3.5	Atenuadores ópticos.....	17
1.3.6	Redes de difracción de Bragg.....	18
1.4	Amplificadores ópticos.....	19
1.4.1	Amplificadores de fibra dopada de tierras raras...	19
1.4.2	Fuentes de bombeo.....	20
1.4.3	Amplificadores de fibra dopada con Erblio.....	21
1.4.4	Ganancia en los EDFA.....	23
1.5	Láseres de fibra.....	23
1.5.1	Topología de láser en línea.....	23
1.5.2	Topología láser en anillo.....	24
1.5.3	Láseres random.....	25
2	Medidas de radiación Gamma mediante un láser de fibra óptica.....	27
2.1	Introducción.....	27
2.2	Analizador de espectros ópticos utilizado.....	27
2.3	Estructura del software de control.....	28
2.3.1	Measures_OSA.....	28
2.3.2	Probe.....	29
2.3.3	Graph.....	30
2.4	Medidas de evolución de potencia.....	32
2.4.1	Medidas en M-12.....	33
2.4.2	Medidas en I-25.....	36
2.5	Medidas de emisión espontánea amplificada.....	41
2.5.1	ASE en M-12.....	41
2.5.2	ASE en I-25.....	46

2.6	Medidas mediante un OBR.....	50
2.7	Análisis de resultados.....	52
3	Implementación de un láser random utilizando DCF.....	54
3.1	Introducción.....	54
3.2	Método de estudio.....	54
3.3	Montajes experimentales y medidas realizadas.....	55
3.3.1	Cavidad lineal con un láser de bombeo.....	55
3.3.2	Cavidad lineal introduciendo un EDFA comercial.....	57
3.3.3	Cavidad lineal con doble fuente de bombeo.....	59
3.4	Análisis de resultados.....	61
4	Conclusiones y líneas futuras de estudio.....	62
5	Bibliografía y referencias.....	63

## Índice de figuras

Figura 1.1:	Estructura de una fibra óptica.....	8
Figura 1.2:	Ley de Snell aplicada al ángulo crítico.....	9
Figura 1.3:	Evolución del índice de refracción y dirección de propagación en distintos tipos de fibras.....	10
Figura 1.4:	Casos de macrocurvatura y microcurvatura.....	11
Figura 1.5:	Fenómenos de absorción y dispersión.....	12
Figura 1.6:	Esquema de funcionamiento de un aislador.....	15
Figura 1.7:	Esquemático de un circulador.....	15
Figura 1.8:	Funcionamiento de un circulador.....	16
Figura 1.9:	Funcionamiento de un WDM como multiplexor.....	16
Figura 1.10:	Esquema funcionamiento de un acoplador.....	17
Figura 1.11:	Funcionamiento de un FBG.....	18
Figura 1.12:	Aplicación de fibra dopada como amplificador.....	20
Figura 1.13:	Niveles de energía del Erblio.....	21
Figura 1.14:	Potencia de salida de una EDF M12 de 5m para distintos valores de intensidad de fuente de bombeo.....	22

Figura 1.15: Potencia de salida de una EDF I25 de 5m para distintos valores de intensidad de fuente de bombeo.....	23
Figura 1.16: Configuración de un láser de fibra óptica en una cavidad lineal...	24
Figura 1.17: Esquema de laser en anillo.....	25
Figura 2.1: Analizador de espectros (OSA) Anritsu MS9740A.....	28
Figura 2.2: Estructura de la función timer.....	29
Figura 2.3: Transferencia de datos y búsqueda de máximos realizado por Probe.....	30
Figura 2.4: Método de inscripción de datos de Potencia Máxima.....	30
Figura 2.5: Código encargado de cargar las medidas realizadas, crear el eje para el gráfico, dibujarlo y guardarlo.....	31
Figura 2.6: Salida de la función Graph.....	31
Figura 2.7: Montaje experimental para medir la evolución de potencia a lo largo del tiempo.....	33
Figura 2.8: Medida de la variación de potencia de salida a lo largo del tiempo utilizando la fibra M12 radiada con 150 Gy.....	34
Figura 2.9: Medida de la variación de potencia de salida a lo largo del tiempo utilizando la fibra M12 radiada con 350 Gy.....	34
Figura 2.10: Pendientes de M-12 radiada con 150 y 350 Gy.....	35
Figura 2.11: Medida de la variación de potencia de salida a lo largo del tiempo utilizando la fibra M12 radiada con 750 Gy.....	35
Figura 2.12: Variación de la potencia de salida a lo largo del tiempo utilizando una fibra I-25 no radiada.....	37
Figura 2.13: Variación de la potencia de salida a lo largo del tiempo utilizando una fibra I-25 radiada con 150 Gy y bombeada con 250 mA.....	38
Figura 2.14: Variación de la potencia de salida a lo largo del tiempo utilizando una fibra I-25 radiada con 350 Gy y bombeada con 100 mW.....	38
Figura 2.15: Comparación de las pendientes en la fibra I-25.....	39
Figura 2.16: Comparación del espectro en potencia de la fibra I-25 radiada con 350 Gy.....	40
Figura 2.17: Montaje experimental para la medida de ASE.....	41
Figura 2.18: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra M-12 sin radiar.....	42
Figura 2.19: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra M-12 radiada con 150 Gy.....	42

Figura 2.20: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra M-12 radiada con 500 Gy.....	43
Figura 2.21: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra M-12 radiada con 1000 Gy.....	44
Figura 2.22: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra M-12 bombeada con 100 mW.....	45
Figura 2.23: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra I-25 sin radiar.....	46
Figura 2.24: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra I-25 radiada con 200 Gy.....	47
Figura 2.25: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra I-25 radiada con 500 Gy.....	48
Figura 2.26: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra M-25 radiada con 1000 Gy.....	48
Figura 2.27: Valores de backscattering para la fibra I-25 en función de la dosis de radiación.....	50
Figura 2.28: Valores de backscattering para la fibra M-12 en función de la dosis de radiación.....	51
Figura 3.1: Montaje de la cavidad láser en configuración lineal con un espejo distribuido mediante el uso de 2.5 km de DCF.....	55
Figura 3.2: Espectro de emisión para una DCF no radiada utilizando el primero de los montajes.....	56
Figura 3.3: Espectro de emisión para una DCF radiada utilizando el primero de los montajes.....	57
Figura 3.4: Segundo montaje realizado diferenciando camino de ida y vuelta y utilizando un EDFA.....	58
Figura 3.5: Espectro óptico de salida utilizando la DCF no radiada en el segundo montaje.....	58
Figura 3.6: Espectro óptico de salida utilizando la DCF radiada en el segundo montaje.....	59
Figura 3.7: Tercer esquema de montaje, en el que se puede observar el doble bombeo utilizado.....	60
Figura 3.8: Espectro de salida utilizando la DCF no radiada en el tercer montaje.....	60
Figura 3.9: Espectro óptico de salida utilizando la DCF radiada en el tercer montaje.....	61

# 1. Fundamentos teóricos

## 1.1 Introducción

En el presente capítulo se describen las bases teóricas necesarias respecto al guiado de luz mediante fibra óptica, el principio de funcionamiento de la fibra dopada con erbio como instrumento óptico, así como otros conceptos necesarios como son las redes de difracción de Bragg y diversos componentes ópticos.

## 1.2 Fibra óptica

La fibra óptica es un tipo de guía de ondas basado en la reflexión total interna y que se usa frecuentemente en las redes de telecomunicaciones debido a su gran capacidad de transmisión, así como a su inmunidad a las radiaciones electromagnéticas generadas por los conductores metálicos. A diferencia de los sistemas basados en cables metálicos, en la fibra óptica la información es transmitida a través de pulsos de luz.

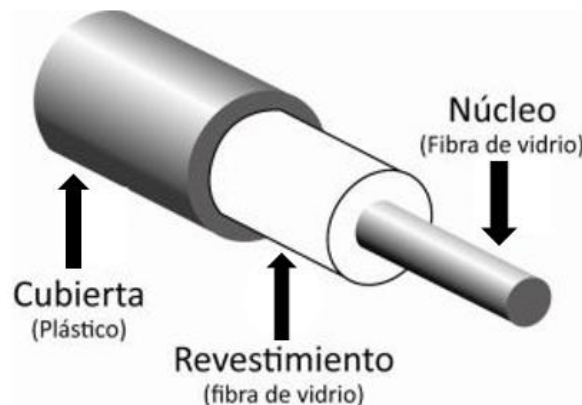


Figura 1. 1: Estructura de una fibra óptica.

La fibra óptica se diseñó, en su versión multimodo, considerando el efecto de la reflexión de la luz. Los pulsos de luz en ella son reflejados debido a la diferencia de índice de refracción entre el revestimiento y el núcleo. La luz propagada depende del ángulo de incidencia del pulso en la frontera núcleo-revestimiento, obedeciendo a la ley de Snell. Toda radiación que incida en la frontera con un ángulo mayor que el crítico se guiará.



$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Con  $n_1$  y  $n_2$  como los índices del núcleo y revestimiento respectivamente

El ángulo crítico  $\theta_c$  de incidencia (y ángulos superiores) hace que la luz no sufra refracción a través del revestimiento, permaneciendo dentro del propio núcleo.

Definimos  $\theta_c$  como:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

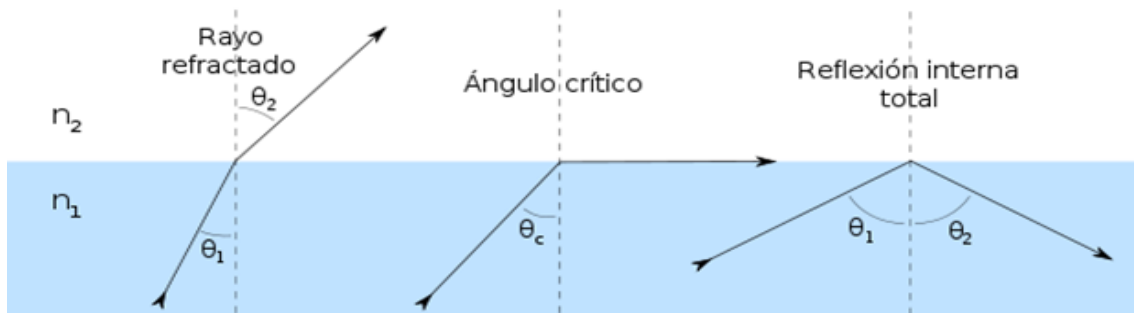


Figura 1. 2: Ley de Snell aplicada al ángulo crítico.

Así, el rayo incidente a mayor ángulo que  $\theta_c$  genera una reflexión total interna, encerrando el pulso óptico en el núcleo de la fibra.

### 1.2.1 Tipos de fibra

Existen principalmente dos tipos de fibra, fibra monomodo, en la cual sólo hay un modo guiado, acortado como SMF, y fibra multimodo, en la cual se transmiten dos o más modos, acortado como MMF.

Respecto a las fibras multimodo, hay una gran variedad, puesto que estas están regidas por el tipo de evolución que sufre el índice de refracción: las fibras de salto de índice, en las cuales el índice de refracción tanto del núcleo como del revestimiento son uniformes, y por lo tanto el cambio de índice de refracción es abrupto, y las fibras de índice gradual, en las que el índice de refracción del núcleo varía de forma gradual desde el centro del núcleo hasta la zona límite del revestimiento.

La forma en la que el índice de refracción disminuye o aumenta y el ancho del núcleo influyen en la cantidad de modos permitidos y su propagación (Figura 1.3).

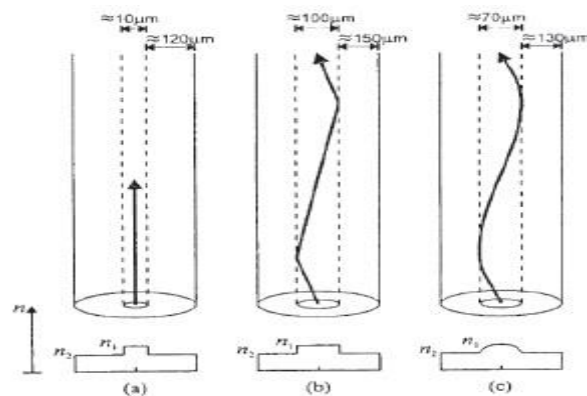


Figura 1. 3: Evolución del índice de refracción y dirección de propagación en: (a) Fibra monomodo, (b) Fibra multimodo de salto de índice y (c) Fibra multimodo de índice gradual.

### 1.2.2 Limitaciones de la Fibra Óptica

La fibra óptica como guía de ondas presenta varias limitaciones respecto a su longitud siendo dos de ellas críticas: la pérdida de potencia inherente a la transmisión de energía en cualquier medio y la velocidad de transmisión digital, ocasionado por el ensanchamiento de pulsos dentro de la fibra, pudiendo interferir unos con otros y generando interferencia entre símbolos (ISI), traduciéndose estas dos limitaciones como atenuación y dispersión.

La atenuación, causada por distintos factores, se caracteriza en dos tipos: intrínseca y extrínseca:

- La *atenuación intrínseca* se debe a factores propios de la fibra, por ejemplo las ocasionadas por imperfecciones en el material durante el proceso de fabricación. Cuando la luz se encuentra con una mácula que presenta diferente comportamiento óptico respecto al núcleo en el que está viajando, ésta puede ser absorbida, transformándose en calor, o dispersada, fugándose del núcleo y generando atenuación. La absorción del material también entra en esta categoría de pérdidas.
- La *atenuación extrínseca* es causada por dos factores externos, las microcurvaturas y las macrocurvaturas (Figura 1.4), siendo las dos causantes de fugas de la luz del núcleo. El primero de ellos, las microcurvaturas, se suele deber ocasionalmente a una presión hecha sobre la fibra o cambios de tensión o temperatura en la fibra durante su colocación o uso. Las macrocurvaturas, por su parte, se debe a que, a la hora de torcer la fibra por necesidades físicas o errores, el ángulo de incidencia antes fijado deja de ser crítico y permite que el pulso de luz fugue. Para prevenir esto, todas las fibras tienen un índice máximo de curvatura permisible, siendo este último error fácil de prevenir.

La existencia de moléculas residuales dentro de la fibra (metales, humedad) son también fuente de atenuación extrínseca. Los efectos no lineales también pertenecen a esta categoría.

Estas pérdidas, debido a que son un producto de fabricación, de la potencia óptica introducida o de la instalación, pueden ser reducidas de forma considerable.

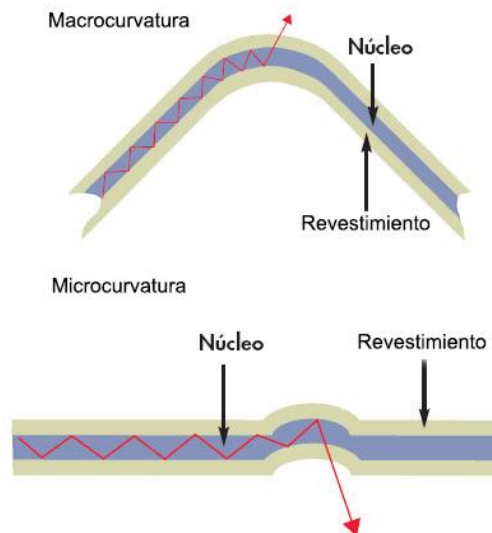


Figura 1.4: Casos de macrocurvatura (arriba) y microcurvatura (abajo)

Respecto a la dispersión, se distinguen tres tipos de dispersión fundamentales:

- La dispersión intermodal, sólo presente en fibras multimodo, debido a la diferente velocidad de propagación de los diferentes modos presentes, ocasionando una latencia entre tiempos de llegada generando un ensanchamiento de pulsos y posible ISI.
- La dispersión intramodal o cromática, especialmente importante en las fibras monomodo debido a su coeficiente de dispersión, creando así una dependencia frecuencial del índice de refracción efectivo, y dado que un pulso está compuesto por varias longitudes de onda, genera un ensanchamiento del pulso final.
- La dispersión por modo de polarización, aunque no tan presente como las dos anteriores, es debida a la modificación de la relación axial del perfil de índice de refracción del núcleo, generando un estado de polarización arbitrario.

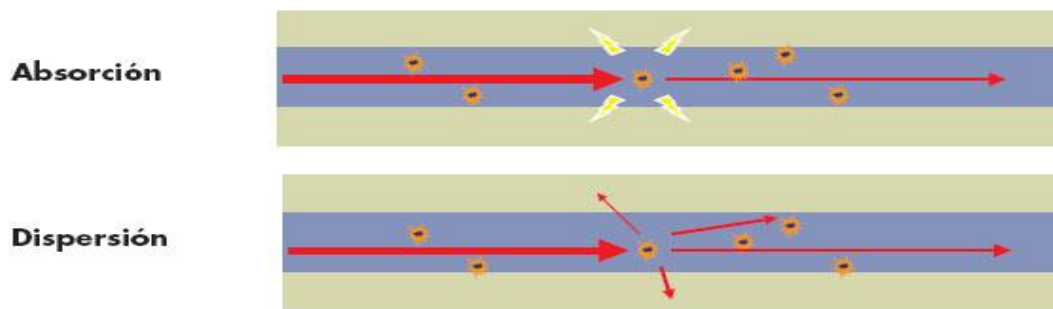


Figura 1.5: Fenómenos de absorción y dispersión

### 1.2.3 Efectos no lineales

En regímenes de baja potencia, los efectos no lineales se vuelven despreciables respecto a los efectos dispersivos. Sin embargo, el empleo de fuentes y láseres de alta potencia, así como el uso de amplificadores ópticos generan una gran densidad de potencia por superficie en el núcleo estimulando los efectos del régimen no lineal. En este régimen aparecen componentes lumínicas distintas de las originales que interactúan con estas creando efectos como la **diafonía** o la **distorsión**. Además, se observa una atenuación extra y cambios de fase, abandonando así la proporcionalidad respecto a la fuente original.

Podemos resumir los principales efectos no lineales:

- El efecto de la *Dispersión Raman Estimulada*, conocido como SRS debido a sus siglas en inglés; presente con potencias lumínicas por encima de cierto umbral, y dependiente de las propiedades físicas efectivas de la fibra. A la hora de transmitir la energía de molécula a molécula en la sílice, determinadas potencias a determinadas frecuencias, cuando inciden en la molécula, pueden excitar modos vibracionales los cuales a su vez generaran fotones de frecuencia inferior o superior, pero diferente a la incidente.
- La *Dispersión Brillouin Estimulada*, acortada como SBS debido a sus siglas en inglés; requiere de una potencia umbral para su estimulación menor que el efecto Raman, sin embargo, tienen una anchura espectral muy pequeña, del orden de 10 MHz, lo que, en comparación con la anchura de la fuente de luz que genera los pulsos que lo estimula, no genera muchas pérdidas

- La *Automodulación de Fase*, acortada como SPM debido a sus siglas en inglés, es originada por el efecto *Kerr*. Este efecto consiste en que el índice de refracción que experimenta el modo fundamental de un pulso lumínico está relacionado con la potencia que transporta. Así, a una determinada potencia, el pulso tiene un cambio de fase instantáneo dependiente de la potencia, generándose un cambio de fase llamado *chirp*. Este cambio de fase genera una modulación de fase en función de la forma del pulso de entrada. De esta forma, el cambio de fase o *chirp* es función de la potencia del pulso, por lo cual se le llama automodulación.
- El efecto de *Modulación de Fase Cruzada*, acortado como XPM debido a sus siglas en inglés, es un efecto realmente dependiente del anterior, aunque en este caso se caracteriza para sistemas *multiplexores por división de longitud de onda (WDM)*, ya que, en estos sistemas, al interactuar en la misma fibra diferentes longitudes de onda, el efecto *Kerr* también se propaga en la misma, pudiéndose evitar controlando la velocidad de propagación por medio de la dispersión.
- El *Mezclado de Cuatro Ondas*, acortado como FWM debido a sus siglas en inglés, al igual que el XPM, sus condiciones como su origen son los mismos: un sistema WDM y el efecto Kerr. Se trata de la generación de nuevas componentes lumínicas debido a su concordancia de fase, siendo el punto más crítico los posibles tonos generados en  $w_{ijk} = w_i + w_j - w_k$ , con  $i$  y  $j$  distintos de  $k$ . Esto genera una fuga de potencia a un cuarto tono.

Estos efectos, aunque indeseables en sistemas de transmisión, pueden ser utilizados en el ámbito de sensores, especialmente los efectos de dispersión Raman y Brillouin; e incluso utilizados como sistemas amplificadores en el caso Raman.

### 1.3 Dispositivos ópticos

Los fundamentos para la transmisión de pulsos lumínicos a través de la fibra óptica eran bien conocidos, pero su uso para las comunicaciones estuvo condicionado a la aparición de diversos dispositivos electroópticos que

permitieran manejar la señal óptica sin tener que convertirla primero al dominio eléctrico.

En este apartado se indicarán los fundamentos teóricos de diferentes y dispositivos ópticos, así como su funcionamiento.

### 1.3.1 Aisladores ópticos

A la hora de montar un circuito óptico con diferentes longitudes de onda y sentidos de propagación, hay que tener en cuenta las reflexiones que se pueden crear. Estas reflexiones son sumamente perjudiciales para las fuentes ópticas como los láseres y es necesario un componente que permita sólo la propagación lumínica en una dirección: los aisladores.

Basado en el efecto Faraday, están constituidos por elementos llamados rotadores de Faraday entre otros; dispositivos construidos con determinados materiales magneto-ópticos capaces de cambiar la polarización de la luz que los atraviesa.

Además del rotador de Faraday, un aislador está compuesto también por un SWP (*Spatial Walk-off Polarizator*) y una placa  $\lambda/2$ . El SWP envía cada polarización, vertical y horizontal por distinto camino y la placa  $\lambda/2$  gira la polarización  $45^\circ$  en función del sentido de propagación.

Así, en sentido de propagación, atraviesan un SWP, lo que divide la polarización, éstas cruzan el rotador de Faraday, girando así su polarización  $45^\circ$  a la derecha, para después atravesar la placa  $\lambda/2$ , teniendo en este momento la componente vertical una polarización horizontal ( $45^\circ$  del rotador y  $45^\circ$  del  $\lambda/2$ ) y la componente horizontal una polarización vertical ( $45^\circ$  del rotador y  $45^\circ$  del  $\lambda/2$ ) juntándose otra vez en el SWP final, volviéndolas a componer.

En sentido de no propagación el funcionamiento de los componentes es el mismo, pero gracias al rotador de Faraday, el único componente de este sistema que siempre induce polarización independientemente del sentido de propagación, la salida del primer SWP (horizontal y vertical) es la misma a la entrada del segundo SWP, haciendo imposible su reconstrucción.

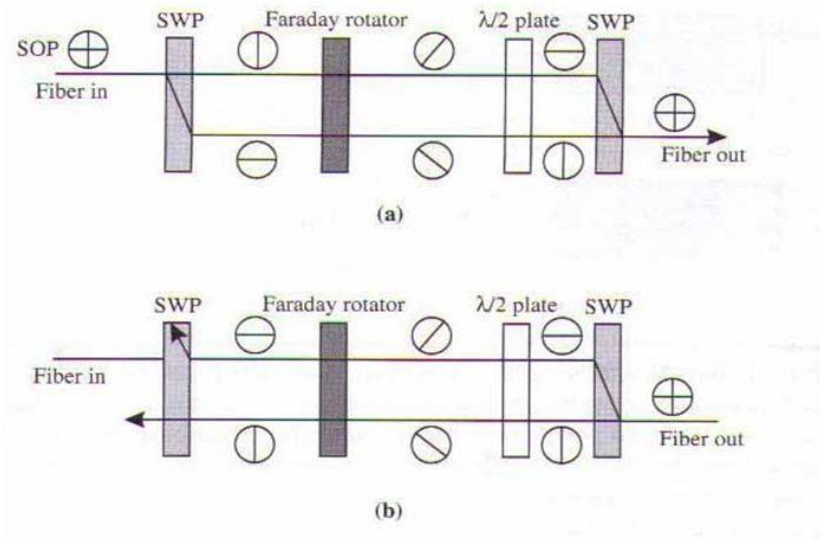


Figura 1.6: Esquema de funcionamiento de un aislador en sentido de propagación (a) y sentido de aislamiento (b)

### 1.3.2 Circuladores

Al igual que los aisladores ópticos, estos se basan también en los rotadores de Faraday y en los SWP, permitiendo encaminar la luz entrante a un determinado puerto, siendo estos puertos de ida y vuelta. Así, la luz incidente por el puerto 1 será encaminada al puerto 2 en sentido de propagación. Y la introducida por el puerto 2 se encaminará al puerto 3. Son muy útiles en sistemas de Add /Drop, permitiendo ir añadiendo componentes frecuenciales sin que interactúen entre ellas.

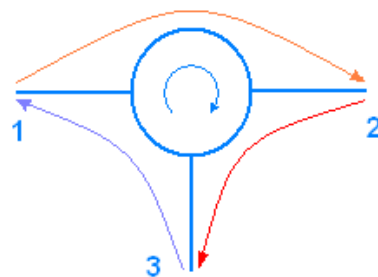


Figura 1.7: Esquemático de un circulador

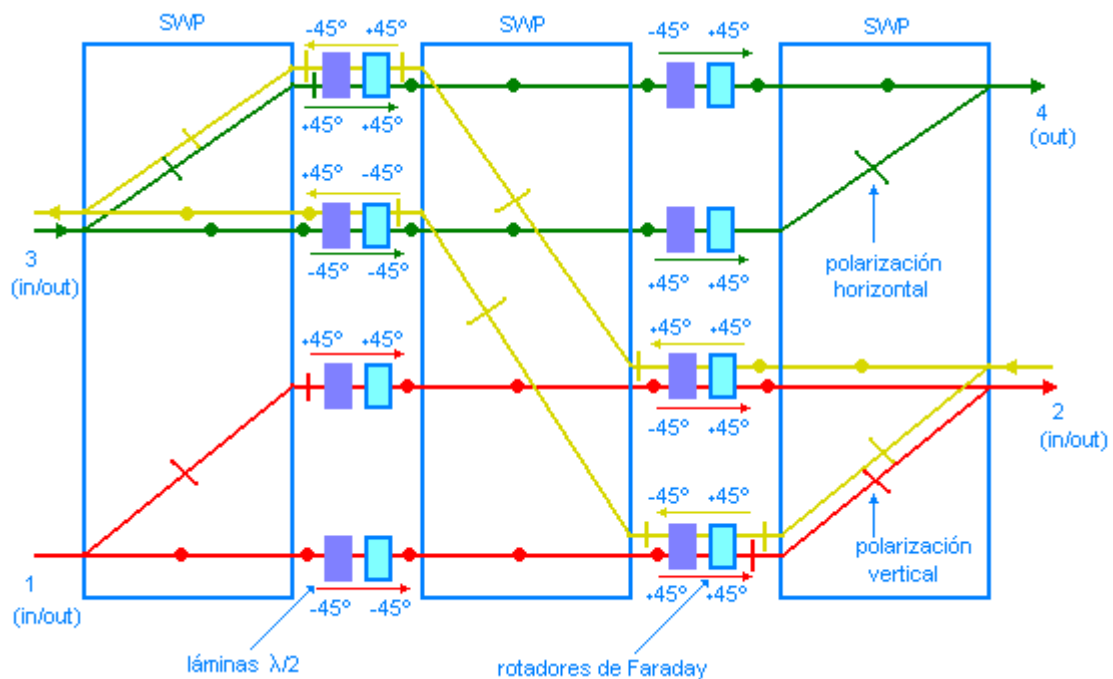


Figura 1.8: Funcionamiento de un circulator.

### 1.3.3 Multiplexor por división de longitudes de onda (WDM)

Son dispositivos pasivos, capaces de multiplexar o demultiplexar, ya que son bidireccionales, diferentes señales lumínicas diferenciándolas por longitudes de onda. Similar a la multiplexación en frecuencia típica en las comunicaciones, estos elementos nos permiten trabajar con más de una señal óptica, localizado en diferente longitud de onda, en la misma fibra óptica.

El más sencillo de ellos tiene tres puertos: dos de ellos se pueden utilizar como entrada, multiplexando sus componentes en el tercer puerto, o dos de ellos se pueden utilizar como salida, demultiplexando ésta última en los dos puertos restantes. Es importante decir que estas dos funciones no son restrictivas entre ellas, así se puede utilizar como multiplexor y demultiplexor al mismo tiempo.

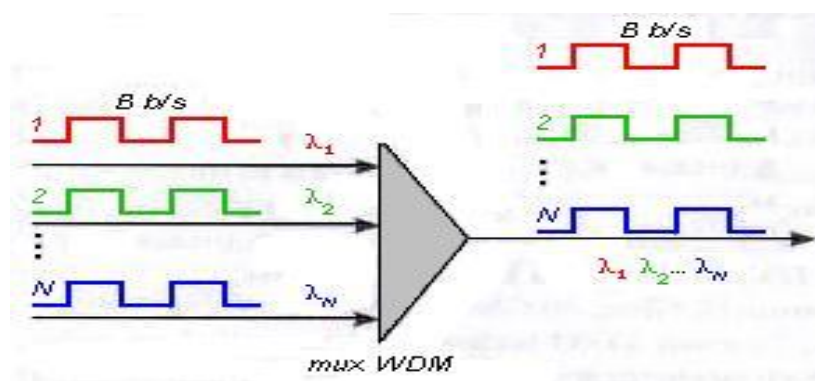


Figura 1.9: Funcionamiento de WDM como multiplexor.



### 1.3.4 Acopladores ópticos

Siendo los componentes más usados a niveles de redes y circuitos ópticos, los acopladores ópticos permiten dividir la potencia óptica, acoplarla, además de sus usos como multiplexores/demultiplexores o divisores de polarización entre otros muchos, siendo típicamente bidireccionales.

Existen configuraciones que van desde los 4 puertos hasta 128, diferentes encapsulados y diferentes métodos de fabricación, usando desde fibra monomodo a guías de ondas planas pasando por varios tipos de fibras.

Su método de funcionamiento, descrito en la Figura 1.10, está basado en el fenómeno óptico de acoplamiento de campos evanescentes. Este fenómeno explica que el campo modal del pulso guiado se extiende más allá del propio núcleo, y al acercarlo suficiente otra fibra, este campo terminará eventualmente por acoplarse a la segunda fibra.

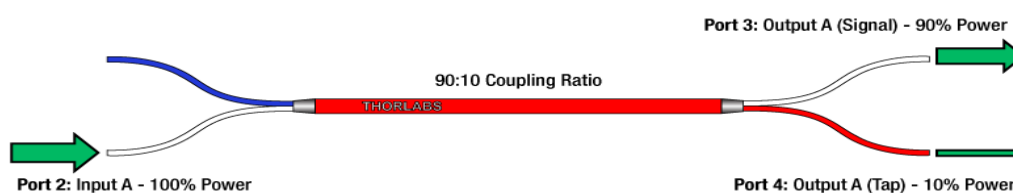


Figura 1.10: Esquema funcionamiento acoplador

### 1.3.5 Atenuadores ópticos

Otro elemento muy importante a la hora de realizar diseños ópticos son los atenuadores. Sirven, principalmente para aportar estabilidad al sistema además de proteger los distintos equipos.

Se dividen principalmente en dos tipos, los de atenuación variable y los de atenuación fija. Esta decisión está típicamente condicionada al conocimiento de potencia óptica necesaria en ese punto de la red, así, si es conocida, este atenuador será usualmente fijo.

De cara a los variables, son sencillos de fabricar y comprender, gracias a lo que se ha explicado antes de las microcurvaturas, estos atenuadores suelen estar basados en tornillos micrométricos que presionan la fibra y generan pérdidas variables y controlables.

### 1.3.6 Redes de difracción de Bragg

Las *redes de difracción de Bragg*, conocidos como FBG debido a sus siglas en inglés, son unos elementos basados en microestructuras fotónicas sobre fibra óptica que actúan como filtro paso banda estrecho en el dominio frecuencial, es decir, en longitudes de onda. La componente rechazada por esta banda no es dispersada sino reflejada, así, si tenemos un espectro completo a la entrada de la red, a su salida tendremos ese espectro menos la banda de rechazo y a la entrada tendremos la banda rechazada en sentido de contra propagación, como se muestra en la Figura 1.11.

Para su funcionamiento es necesaria una variación periódica del índice de refracción del núcleo, lo cual se consigue típicamente usando fibra sensibilizada a radiación ultravioleta y máscaras de fase.

Este método emplea un elemento conocido como máscaras de fase, el cual crea una modulación especial en el haz de radiación ultravioleta. Así, al colocar una fibra sobre una máscara de fase, en el núcleo de la fibra quedará marcado un patrón de difracción en el núcleo con periodicidad en función de la propia periodicidad de la máscara de fase.

Se usan habitualmente como sensores, pues la sensibilidad de la banda de rechazo frente a parámetros físicos como la temperatura o la tensión es sumamente elevada, además de en sistemas de láseres, que, combinados con los elementos antes vistos, permiten crear sistemas de láseres de fibra de una o más longitudes de onda combinadas [1]

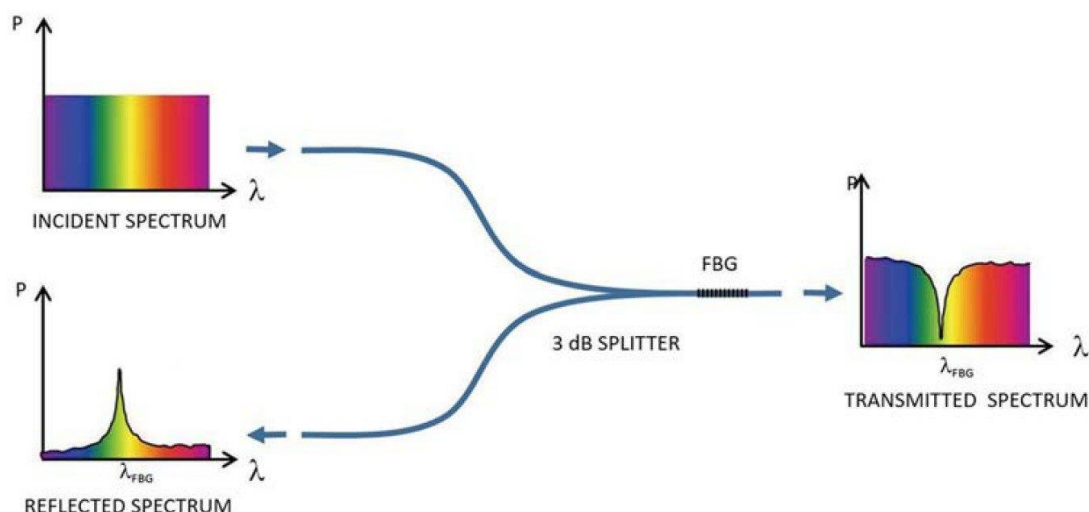


Figura 1.11: Funcionamiento de un FBG. Se puede observar el efecto de reflexión de la banda de rechazo

## 1.4 Amplificadores ópticos

Las señales ópticas, como todas las demás señales que transmiten datos, están condicionadas a un cierto alcance máximo en función de la atenuación existente a cada longitud de onda. Para solucionar este problema sin necesidad de transformadores opto-electrónicos se usan los amplificadores ópticos.

Estos elementos amplifican la potencia óptica sin afectar al resto de sus características, prescindiendo así de medios transformadores. Estos elementos, además de usarse para la amplificación en redes de fibra, son usados como medios activos, por ejemplo, en láseres de fibra.

Las ventajas de los amplificadores ópticos se pueden traducir en potencia y espacio. Estos tipos de amplificadores tienen una relación de ganancia y longitud de fibra acorde a una determinada potencia de bombeo, pero al estar constituidos de fibra puede recogerse para ocupar poco volumen.

Hay tres tipos básicos de amplificadores ópticos basados en fibra: los basados en fibras dopadas con tierras raras, por un lado, y los que utilizan del efecto Raman y Brillouin por otro lado. Estos dos últimos no serán objeto de estudio en este trabajo.

### 1.4.1 Amplificadores de fibra dopada de tierras raras

Estos amplificadores ópticos de fibra dopada se realizan dopando fibra óptica con iones de distintas tierras raras ( $Pr^{3+}$ ,  $Tm^{3+}$ ,  $Er^{3+}$ ). La elección del elemento con el que se dopará la fibra dependerá de la ventana que se quiera usar en esta última.

Así, para la ventana localizada desde 1280 a 1340 nm se usa Praseodimio (Pr), para localizar la amplificación en 1450 a 1520 nm se utiliza Tulio (Tm) y el Erblio (Er) se emplea para la ventana de 1500 a 1600 nm. Dado el gran uso que se realiza de esta tercera ventana, los amplificadores basados en fibra dopada con Erblio son los más comunes.

Para conseguir amplificación, se bombea la fibra óptica a una longitud de onda inferior a la que se quiere amplificar y que depende de la tierra rara usada. Al absorberse el bombeo, se excitan los iones dopantes. Al estar excitados, aumentan su nivel de energía a un punto inestable, y al abandonar este estado a uno semiestable, producen fotones a las frecuencias anteriormente descritas.

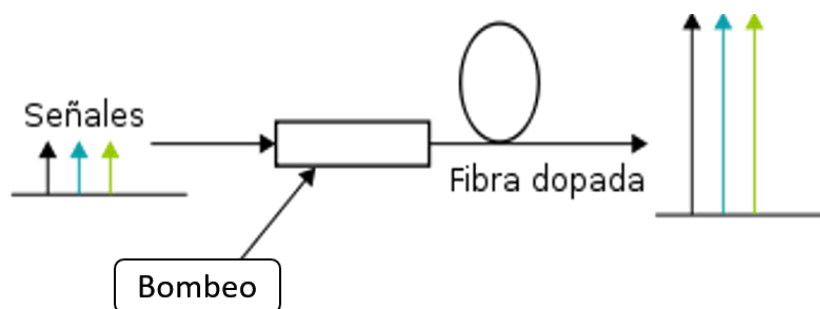


Figura 1.12: Aplicación de fibra dopada como amplificador.

Este mecanismo, que consigue la inversión de población y es similar al ocurrido en semiconductores. Está condicionado a una longitud óptima de la fibra que se usa como amplificador, pudiendo a llegar a producir atenuación si se excede y desaprovechándose si se acorta. Por ello se establece una solución de compromiso entre su longitud junto con la ganancia o la atenuación que produce.

Otra característica de estas fibras es la concentración de dopante. Según lo explicado hasta ahora, cabe entender que a mayor concentración mayor cantidad de fotones serán emitidos y mayor potencia será amplificada, pero esto es incorrecto. Cuando hay una gran cantidad de iones, estos interactúan entre ellos debilitando la amplificación, así, se suele preferir longitudes largas con concentraciones débiles para evitar este caso.

#### 1.4.2 Fuentes de bombeo

La fibra dopada necesita de una fuente de bombeo. Las encargadas de suministrar esta alimentación óptica son las fuentes, típicamente láseres de frecuencia superior, que excitan los iones dopantes generando la ganancia en la banda indicada.

Así, se habrá de introducir a la vez, tanto la fuente de bombeo como la señal a amplificar en la fibra óptica dopada, obteniéndose a su salida la señal introducida amplificada en función de la potencia de bombeo utilizada.

Para su correcta utilización, las fuentes deben ser controladas minuciosamente, prestando especial atención a la corriente de alimentación y a la temperatura del láser. Esto último se realiza mediante varias técnicas, siendo una de las más usadas los semiconductores, utilizándolos como refrigeradores aprovechándose del efecto termoeléctrico *Peltier* [2].

### 1.4.3 Amplificadores de fibra dopada con Erblio (EDFA)

Siendo la banda de 1500 a 1600 nm la más utilizada en sistemas de comunicaciones debido a sus menores pérdidas en la fibra óptica, los amplificadores de fibra dopada con Erblio (EDFA) son los más comunes. Además, poseen una excelente relación entre la potencia de bombeo y la amplificación obtenida.

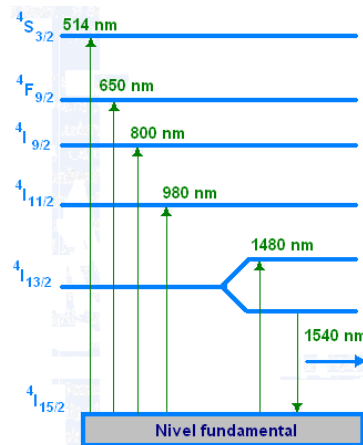


Figura 1.13: Niveles de energía del Erblio

En el caso del Erblio, se puede observar (*Figura 1.13*) que la diferencia entre los niveles  $4I_{13/2}$  y  $4I_{15/2}$  se corresponde con una longitud de onda comprendida en la tercera ventana. Provocando una inversión de población en este nivel podremos amplificar en esta ventana. Los dos niveles superiores a  $4I_{13/2}$  son poco estables, luego cualquier electrón que llegue a estos niveles acabará bajando al  $4I_{13/2}$ .

A la hora de elegir la longitud de onda de bombeo, se suelen utilizar fuentes en 980 y 1480 nm. La decisión sobre usar una u otra recae en la banda que queramos usar. A parte de evitar la tercera ventana en nuestro bombeo, una fuente a 980 nm nos generara un amplificador con menor ruido, pero más restrictivo en cuanto a saturación, mientras que a 1480 nm las prestaciones se invierten, pudiendo alcanzar más potencia más fácilmente, pero aumentando el ruido de la misma forma.

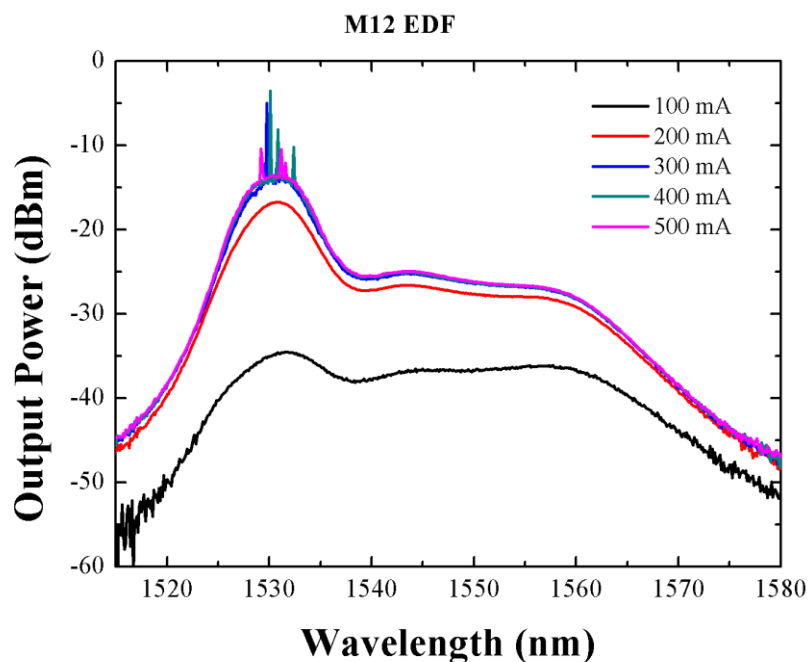
### 1.4.4 Ganancia en los EDFA

La ganancia de estos amplificadores está sujeta a muchos factores restrictivos, tales como la longitud óptima de la fibra, que es la longitud necesaria de una fibra dopada de Erblio en la que aprovecha al máximo una determinada potencia de bombeo. Además, los EDFA no presentan una curva de ganancia

constante, debido a la saturación según aumenta la potencia de entrada. La ganancia suele presentar un máximo, típicamente en 1530nm, para luego aplanarse a partir de 1540nm. Es por esto que se usan en longitudes de onda de transmisión de 1550nm, las cuales están en la zona de ganancia plana facilitando la ecualización

No todas las fibras dopadas con Erblio tienen la misma curva de ganancia, dependiente ésta también de su proceso de fabricación , de la potencia de bombeo y de la concentración de iones en su núcleo.

Para observar esta diferencia gráficamente, se muestran dos curvas de respuesta de dos fibras ópticas dopadas con Erblio de misma longitud (Figuras 1.14 y 1.15), cinco metros, y alimentadas con la misma fuente de 980nm a diferentes corrientes de bombeo:



*Figura 1.14: Potencia de salida de una EDF M12 de 5m para distintos valores de intensidad de fuente de bombeo.*

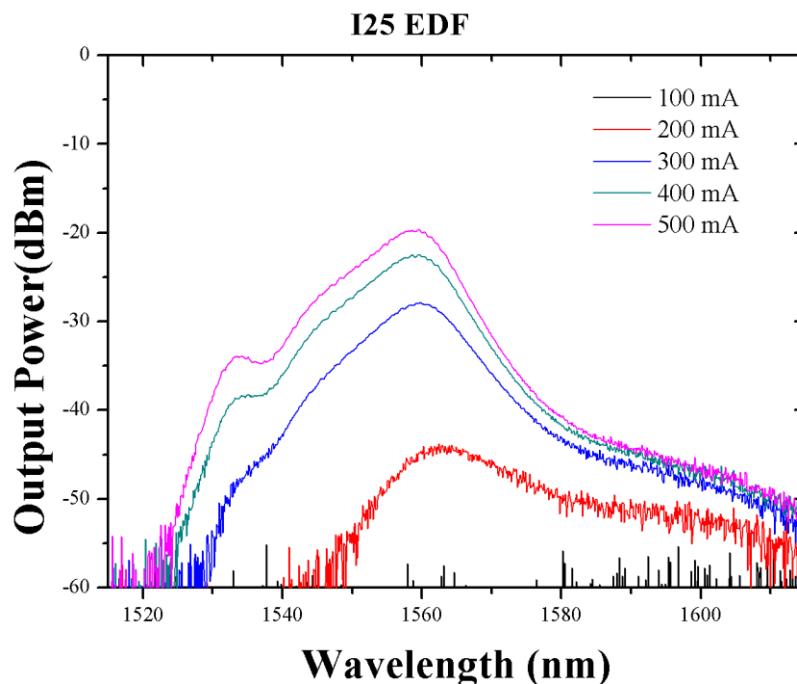


Figura 1.15: Potencia de salida de una EDF I25 de 5m para distintos valores de intensidad de fuente de bombeo.

## 1.5 Láseres de fibra

Un láser de fibra es un láser en el que el medio de ganancia activo está basado en fibra óptica dopada con tierras raras o en efectos explicados anteriormente como son la emisión estimulada Raman (SRS), la emisión estimulada Brillouin (SBS) o el mezclado de cuatro ondas (FWM).

En nuestro caso nos centraremos en los casos de fibra dopada. Usando esta fibra como método de ganancia a las longitudes de onda deseadas, es necesario también realizar configuraciones ópticas que permitan una realimentación selectiva en longitud de onda. Para ello existen diferentes medios que nos permiten crear sistemas retroalimentados capaces de llevar a cabo la emisión.

### 1.5.1 Topología de laser en línea

Un láser en cavidad lineal es un sistema que permite, mediante la implementación de dos espejos situados en los extremos del láser, una realimentación continua.

Los espejos tienen la función de redirigir la potencia óptica de vuelta al circuito óptico. Estos espejos pueden ser por ejemplo implementados mediante circuladores o redes de difracción de Bragg [3].

Uno de los más comunes y utilizados de este tipo de láseres es el que usa fibra dopada con erbio (*EDF*) como medio activo de ganancia, pudiendo sintonizar la frecuencia mediante un FBG. Ante la necesidad de potencia de bombeo para estimular la amplificación de la *EDF*, se utiliza una fuente de bombeo a una longitud de onda conveniente, como se ha mencionado antes, que se introduce en la cavidad óptica mediante un *WDM*.



Figura 1.16: Configuración de un láser de fibra óptica en una cavidad lineal

### 1.5.2 Topología laser en anillo

En este caso, la estructura de recirculación de la luz contenida en el sistema láser se realiza mediante una topología de anillo.

El sistema se basa en una fuente de bombeo conectada a un WDM, que aporta la potencia necesaria a una fibra dopada para generar, en primera instancia, toda la gama de potencia generada por el tipo de dopante que contenga la fibra. A continuación, como muestra la figura 1.17 se coloca un circulador, que dirige esta banda completa a un FBG. Debido al comportamiento de los FBG descrito anteriormente, éste refleja una fracción del espectro incidente. Gracias al funcionamiento del circulador, la señal luminosa se redirige



a una tercera salida, aislando la vía de entrada por donde había incidido el espectro de emisión de la fibra dopada de la reflexión producida por el FBG.

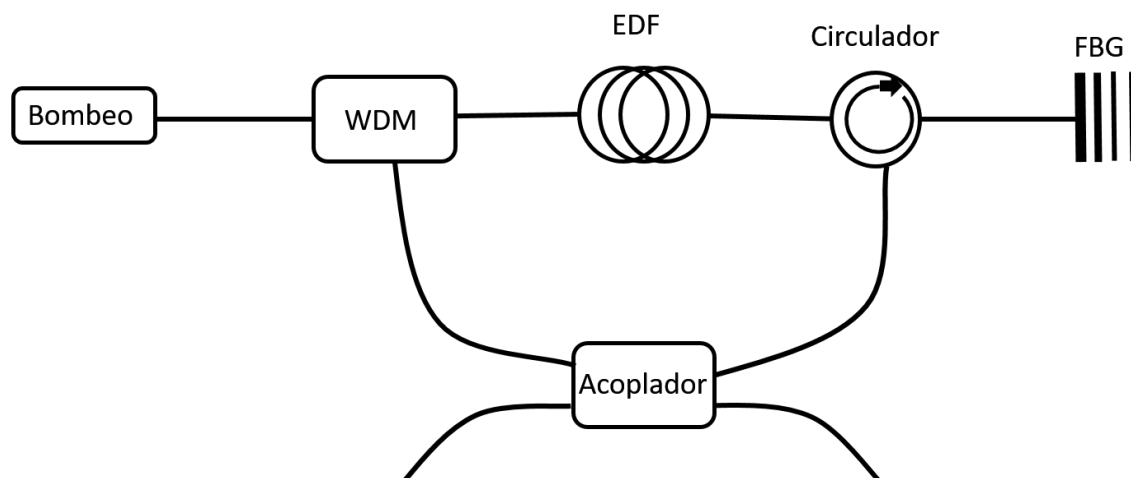


Figura 1.17: Esquema de láser en anillo

En este punto, se tiene una respuesta espectral de anchura fija producida por el FBG, el cual es extraído del sistema de anillo mediante un acoplador, siendo ésta la salida de nuestro láser.

La rama restante del acoplador se reintroduce en el WDM, que lo multiplexa con la fuente de bombeo para retroalimentar la fibra dopada, ésta vez teniendo también estimulación en la longitud de onda de interés.

De esta forma, el sistema amplificador se realimenta de la señal a amplificar, hasta que llega a la saturación generando así la potencia máxima de salida.

En este tipo de láseres el elemento típico de sintonización es el FBG, pudiendo acoplarse múltiples de ellos para crear láseres con topología de anillos de múltiples longitudes de onda con las mismas características. [1].

### 1.5.3 Láseres random

Los láseres random son láseres que utilizan un reflector (o varios) que presentan un gran desorden en cuanto a la localización espacial de los puntos de reflexión. Los láseres random no utilizan una cavidad óptica convencional, pero los principios de operación son los mismos que los de un láser de fibra convencional.

Están basados en la amplificación de la dispersión generada en este reflector aleatorio. Esto quiere decir que el medio activo tiene un gran número de

imperfecciones, las cuales generan una retro-dispersión aleatoria pero constante **[4]**.

Debido a ésta aleatoriedad se pueden conseguir grandes potencias de emisión, siendo esta potencia muy estable.

## 2- Medidas de radiación Gamma mediante un láser de fibra óptica.

### 2.1 Introducción

Recientemente se están descubriendo nuevas aplicaciones para la radiación Gamma que no están limitadas a la industria nuclear como la medicina, la esterilización o el procesamiento de materiales entre otros. Por esto, el estudio del efecto de las radiaciones ionizantes en diferentes tipos de fibras ópticas es un estudio interesante para entender y desarrollar sistemas de control de radiación en entornos ricos en radiación.

Es bien conocido que una fuente de bombeo, usualmente a 980 nm, es responsable del *photobleaching* de fibras dopadas de erbio (*EDF*), además, es generalmente aceptado que el *darkening* o degradación de la fibra puede ser ocasionada por una atenuación inducida por radiación (*RIA*) [5]. Prueba de esto son los numerosos estudios acerca de las pérdidas inducidas por radiación en los amplificadores de fibra dopada con erbio (*EDFAs*). Se ha estudiado el comportamiento de diferentes tipos de fibras sometidas a diferentes cantidades de radiación, principalmente para observar su evolución de potencia durante el tiempo dentro de una cavidad láser en anillo. Estudios limitados a baja radiación (<100 Gy) han sido ya realizados en otros entornos [6].

En este caso se estudiarán fibras radiadas hasta 1000 Gy. Se han caracterizado estas fibras de tres formas: variación de potencia en el tiempo, como ha sido mencionado antes, medidas de la emisión espontánea amplificada (ASE según sus siglas en inglés) y mediante un reflectómetro óptico (OBR). El objetivo es demostrar que la radiación introducida en una fibra es medible en cuestión del tiempo que lleve la estabilización de su potencia de salida si se introduce en una cavidad láser, espectros de emisión espontánea y medidas de su atenuación.

### 2.2 Analizador de espectros ópticos utilizado.

Para la medida de la potencia óptica a la salida y su espectro, se ha utilizado un analizador de espectros ópticos (*OSA*, según sus siglas en inglés) de la marca Anritsu America y modelo MS9740A, el cual se muestra en la Figura 2.1.



*Figura 2.1: Analizador de espectros (OSA) Anritsu MS9740A*

Las medidas se han realizado usando una resolución de 0.03 nm, la menor disponible en este equipo, que va desde los 0.03 a 1.0 nm y un muestro de 1001 puntos en un *span* de 5nm.

## 2.3 Estructura del software de control

A la hora de realizar las medidas, y dada su gran importancia en cuanto a fiabilidad temporal (poder captar la evolución de la potencia en la fibra en momentos equidistantes en el tiempo) y la duración, fue necesario el desarrollo de un programa que controlara el OSA de manera eficaz, rápida y fiable para que, una vez conectado al sistema, el propio programa se encargara de tomar las medidas durante un número determinado de horas cada cierto número segundos y después las procesara.

Para ello se optó por diseñar un programa en Matlab basado en tres funciones que se explicarán a continuación.

### 2.3.1 Measures\_OSA

La función o programa a utilizar en la que se principalmente este apartado es Measures\_OSA, la encargada de iniciar la comunicación con el OSA. Esta precarga una carpeta en la que se encuentran las funciones principales del

MS9740A, las cuales son pequeñas funciones descritas en las especificaciones del control remoto del OSA, pero traducidas a código Matlab.

Además de crear el objeto que será nuestro OSA durante el programa, será el programa en el que indicaremos nuestro tiempo de medición, en horas, minutos y segundos, así como el intervalo, expresado en segundos, para tomar una muestra.

Finalmente, ya que queríamos utilizar una medición basada en intervalos de tiempo, se optó por la función *timer*, la cual tiene una estructura basada en tres llamadas. La primera se realiza cuando se inicia dicho *timer*, la segunda en si es el propio *timer*, habiéndole indicado los segundos y el número de repeticiones que debe realizar (este último número calculándose dividiendo el tiempo total de medida entre el intervalo de medida), cada vez que pasen esos segundos llamará a la función asignada; y por último la función de fin de *timer*, la cual se activa al terminar todo el conteo establecido. Esta sintaxis se muestra en la Figura 2.2.

En nuestro caso, no requeríamos de función de inicio, ya que las variables de tiempo se indicaban en el propio programa, y el nombre de archivo utilizado para las medidas se pedía por pantalla antes de iniciar el *timer*.

Como función de *timer* y de final de *timer* disponemos de *Probe* y *Graph* respectivamente, las cuales analizaremos a continuación.

```
t=timer('Name', 'OSA', 'StartDelay', Inter, 'Period',...,
Inter, 'TasksToExecute', Nm, 'ExecutionMode', 'fixedRate');
t.TimerFcn=@(x,y) Probe(nombre,MS9740A);
t.StopFcn=@(x,y) Graph(nombre,Nm);
```

Figura 2.2: Estructura de la función *timer*

### 2.3.2 Probe

Siendo la función crítica de nuestro programa, *Probe* se encarga de tomar los datos del OSA mediante el enlace anteriormente creado. Para esta toma de datos se podía optar por dos opciones: utilizar la función de medir una vez, lo cual haría que el OSA midiera cada vez que le pidieran datos, o ponerlo en modo de repetición de medidas en todo momento y tomando la medida que esté realizada en el momento de pasarla al programa. Se optó por este último para facilitar el trabajo, puesto que, aunque una medida sea tomada, por ejemplo, cada 20 segundos, puede interesarnos observar la evolución constante en la pantalla del OSA.

```
[Pm, Wm]=MS9740A_transferData(k);%cojemos los datos
[PotMax,tmp_ind]=max(Pm);%buscamos el maximo
%de potencia en el espectro analizado
```

Figura 2.3: Transferencia de datos y búsqueda e máximos realizado por *Probe*.

Después de tomar las medidas proporcionadas, que están formadas por 1001 puntos distribuidos en longitudes de onda y una potencia de salida asociada a cada uno de estos puntos, estos valores se analizan, con la función mostrada en la Figura 2.3, calculando el máximo de potencia y guardando, entre otros muchos, este valor y su longitud de onda asociada.

Quizá la función más importante que realiza es el volcado absoluto de todos los datos a archivos .txt (mostrada en la Figura 2.4), haciendo de esta forma un sistema que nunca pasa de manejar más de 2002 datos, previniendo bloqueos y fallos durante la medida, y asegurando éstas ante una inesperada desconexión o apagado del sistema.

En total, la función *Probe* crea y actualiza, con cada medida, cuatro archivos. En dos de ellos se guardan cada una de las medidas realizadas, un archivo para la potencia y otro para la longitud de onda del *span*. En otras dos se guardan el principal objetivo de estudio de este diseño, la potencia máxima de salida, y otro archivo para su a de longitud de onda asociada.

Finalmente, cierra cada archivo abierto, de forma que, si ocurre cualquier problema, las medidas realizadas hasta ese punto no serán afectadas.

Estos archivos creados por *Probe* son los que finalmente se analizan en la función de fin de *timer*, *Graph*, que será explicada a continuación.

```
fprintf(P2data, '%d ', PotMax);%y escribimos los respectivos valores
fprintf(P2data, '\r\n');
```

Figura 2.4: Método de inscripción de datos de Potencia Máxima

### 2.3.3 Graph

Por último, la función a la que se llama a trabajar una vez ha terminado el tiempo de medida absoluto y se han tomado datos de la evolución de potencia es *Graph*, mostrada íntegramente en la Figura 2.5.

```

%abrimos los archivos en los que hemos ido localizando los datos
pdata=load(['Powm_' i '.txt']);
wdata=load(['Wavm_' i '.txt']);
%creamos el eje de muestras
ejex=1:n;
h=figure;
subplot(2,1,1); plot(ejex,pdata, '.'); title("Potencia");
subplot(2,1,2); plot(ejex, wdata, '.'); title("Longitud de onda de maximo");
saveas(h,i, 'fig');

```

Figura 2.5: Código encargado de cargar las medidas realizadas, crear el eje para el gráfico, dibujarlo y guardarlo.

Este se encarga de cargar los datos guardados anteriormente por *Probe* y analizarlos, mostrando en pantalla la evolución de estos con el tiempo (Figura 2.6), mostrados en eje como numero de muestras y guardando cada figura creada, para su posterior estudio si fuera necesario, y calculando también la relación señal a ruido basándose en la medida realizada habiendo transcurrido la mitad del tiempo absoluto (*SNR*) y volcándola en un .txt.

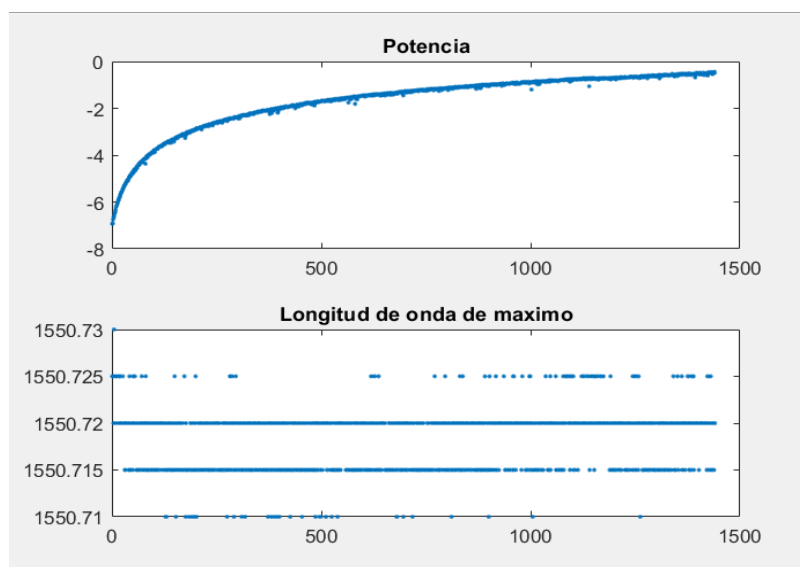


Figura 2.6: Salida de la función *Graph*.

Una de las ventajas de la estructuración del programa de medida en tres diferentes funciones es que, después de iniciar la comunicación con el MS9740A, se pueden utilizar independientemente del *timer*, es decir, se puede tomar datos del OSA o graficar datos previos solo modificando dos líneas de cada código, pudiendo así, por ejemplo, unir diferentes archivos creados con las medidas en diferentes momentos de la misma fibra y graficándolos todos juntos con *Graph*, siendo esta última función totalmente independiente de la comunicación con el OSA.

## 2.4 Medidas de evolución de potencia.

La primera fibra dopada de erbio (*EDF*) analizada ha sido la M12 (980/125), una fibra altamente dopada de erbio con una gran eficiencia de conversión y diseñada para amplificadores de banda C de pequeño tamaño. La segunda en estudio ha sido la tipo I25 (980/128), ésta también diseñada para amplificadores de banda C con una composición de núcleo optimizada para DWDM de gran número de canales. Los dos tipos de fibras han sido desarrolladas por la empresa Fibercore. A continuación, se muestra la tabla de características de los dos tipos de fibras usadas.

Tipo de <i>EDF</i>	M-12	I-25
Absorción máxima (1530nm)	19.55 dB/m	40.36 dB/m
Absorción a 979 nm	12.71 dB/m	24.2 dB/m
Atenuación a 1200 nm	5.7 dB/km	7 dB/km
Diámetro revestimiento	246.5 $\mu\text{m}$	240.5 $\mu\text{m}$
Concentricidad de núcleo	0.26 $\mu\text{m}$	0.1 $\mu\text{m}$
Longitud de onda de corte	962 nm	900 nm
Diámetro de la fibra	125.2 $\mu\text{m}$	125.4 $\mu\text{m}$
Diámetro de campo modal	6 $\mu\text{m}$	5.7 $\mu\text{m}$
Apertura numérica	0.22	0.24

Estos dos tipos de fibra han sido usados como elemento activo en la cavidad láser diseñada. Como elemento de bombeo se ha utilizado una fuente láser centrada en 976nm conectada a un WDM. Un FBG uniforme centrado en 1550,7nm y un circulador han sido los medios empleados para reinserir la longitud de onda deseada en el anillo. Finalmente, se ha utilizado un acoplador 90:10 para extraer un 10% de la potencia de anillo, redirigiendo esta última al analizador de espectros ópticos utilizado en este experimento y del que se ha hablado previamente.

Todas las medidas han sido realizadas bajo las mismas condiciones, con mismas fuentes de bombeo, WDM y FBG. También se han medido, siempre que ha sido posible, la misma longitud de fibras dopadas para todos los casos, cinco metros y las medidas han sido realizadas a temperatura ambiente del laboratorio, alrededor de 25 grados Celsius. La figura 2.7 muestra un esquema del montaje experimental para la medida de la evolución de la potencia óptica del láser generado a lo largo del tiempo.



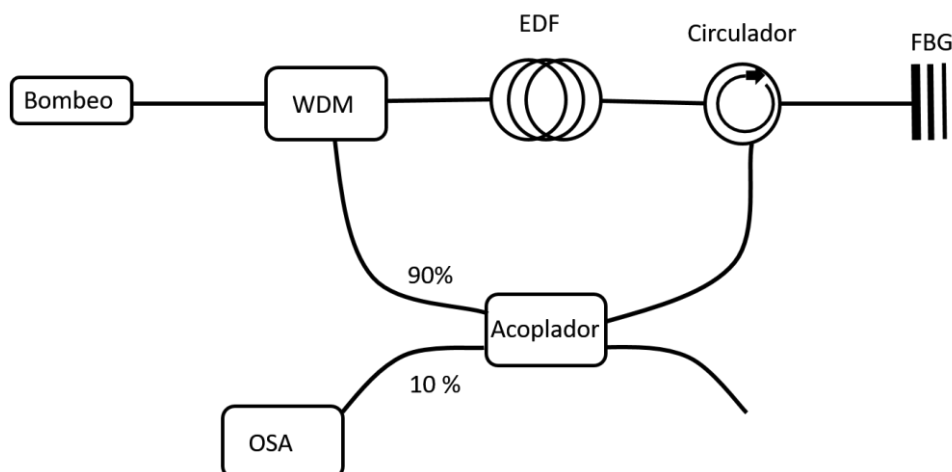


Figura 2.7: Montaje experimental para medir la evolución de potencia a lo largo del tiempo.

Así pues, el montaje descrito y con el programa anteriormente explicado, ha sido posible evaluar la potencia generada por la cavidad en anillo y su evolución con el tiempo, marcando especial atención a las pendientes, las cuales son las que más han diferenciado la dosis recibida de radiación en cada fibra.

Todas las medidas han sido realizadas con un intervalo de 5 segundos y a temperatura ambiente del laboratorio.

Las potencias de bombeo utilizadas han sido de 100mW para todos los casos excepto en las fibras radiadas con 750 y 1000 Gy, que han sido de 250 mW.

#### 2.4.1 Medidas en M12

Con objetivo de caracterizar las pendientes en la M-12, y al igual que en la I-25, se ha utilizado el programa anteriormente descrito para que tomara muestras a intervalos de 5 segundos.

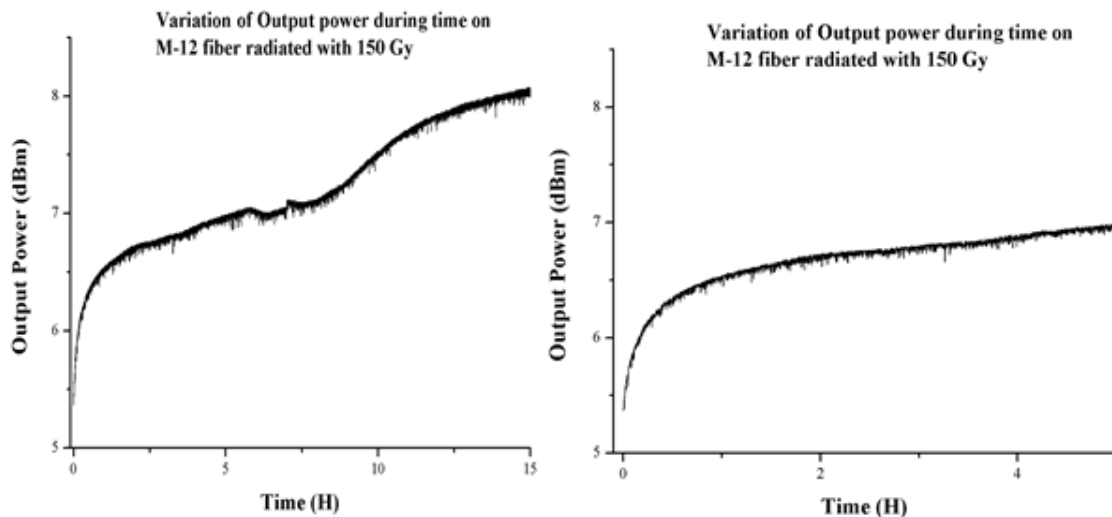


Figura 2.8: (a) Medida de la variación de potencia de salida a lo largo del tiempo utilizando la fibra M12 radiada con 150 Gy. (b) Zoom de la pendiente inicial.

Como se puede observar en la Figura 2.8(a), hay claramente dos pendientes diferenciadas, la que va desde el comienzo de la medida hasta pasada una hora y el resto. Es la inicial la que nos interesa, en el segundo gráfico, Figura 2.8(b), se ha realizado un zoom a esa zona, donde se ve claramente la diferencia de pendiente entre la etapa de crecimiento acelerado y el propio cambio de potencia debido a la variación de temperatura en el *FBG*. Debido a que la dosis de radiación es pequeña en comparación con otras, su pendiente es inferior, siendo esta diferencia entre inicio y final del orden de 2,2 dB.

Ahora continuaremos observando la evolución cuando el mismo tipo de fibra ha sido radiado con 350 Gy.

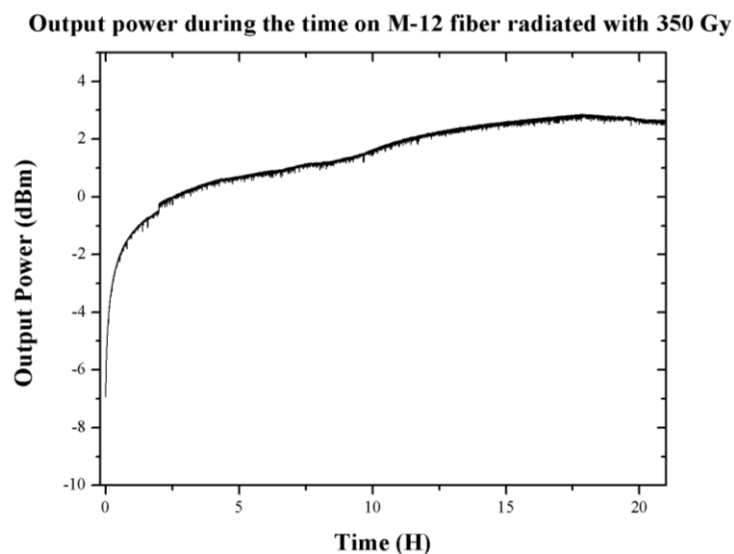


Figura 2.9: Medida de la variación de potencia de salida a lo largo del tiempo utilizando la fibra M12 radiada con 350 Gy.

Para el caso de la fibra M-12 radiada con 350 Gy (Figura 2.9), la potencia inicial es mucho menor, pero la pendiente de la curva generada es mucho mayor, siendo la diferencia entre inicio y fin de la medida de unos 9 dB.

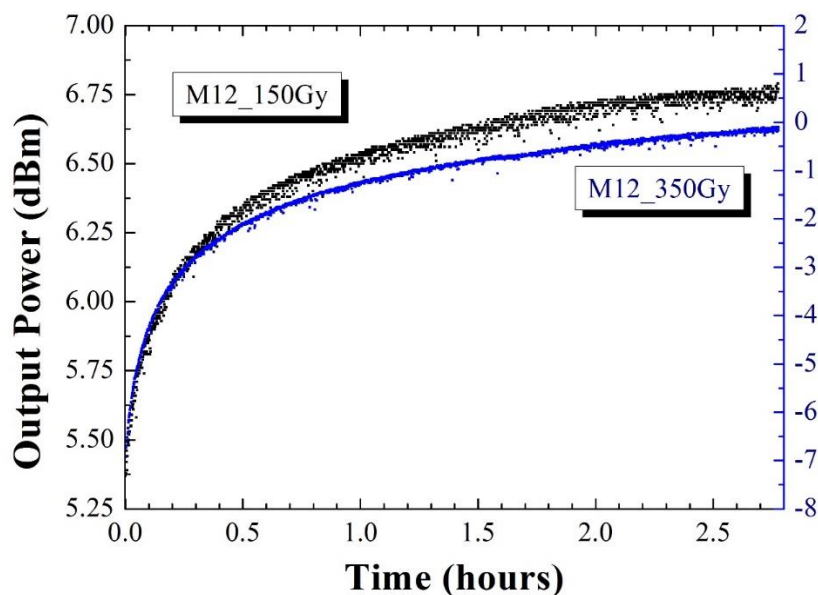


Figura 2.10: Comparación de pendientes de M-12 radiada con 150 y 350 Gy

Realizando la comparación de las pendientes de la fibra dopada de erbio M-12 radiada con 150 y 350 Gy (Figura 2.10), podemos observar que las pendientes son similares, a distintos niveles de potencia debido a la mayor atenuación inducida por la radiación en el caso de 350 Gy.

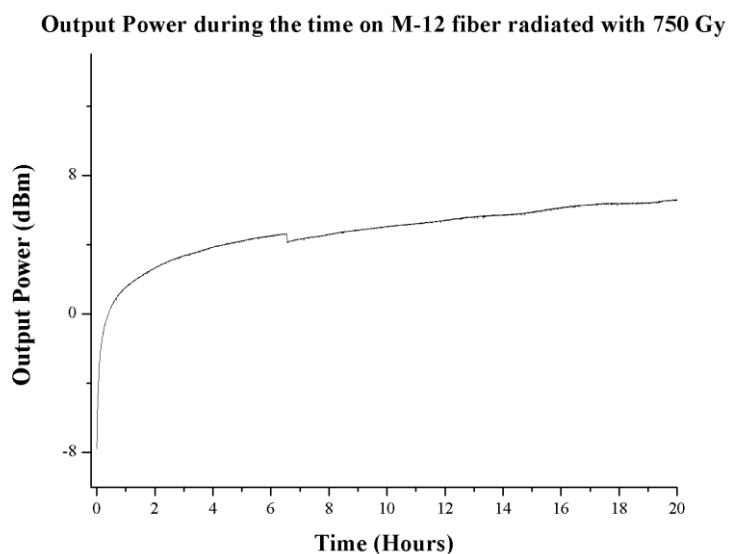


Figura 2.11: Medida de la variación de potencia de salida a lo largo del tiempo utilizando la fibra M12 radiada con 750 Gy.

En el caso que se puede observar en la figura 2.11, fue necesaria más potencia para que la fibra comenzara a emitir. Bombeando con una potencia de 100 mW no se conseguía la amplificación estimulada requerida, así que se optó por utilizar el máximo de potencia disponible, 250 mW. Se puede observar que en este caso el aumento de potencia fue de más de 13 dB y el tiempo de estabilización también aumentó proporcionalmente con la dosis de radiación estudiada.

Fue necesario el uso de un atenuador variable, introducido en la salida al OSA, para mantener la seguridad del mismo debido al gran aumento de potencia sufrido. La atenuación necesaria fue de 9 dB, sin embargo, los datos mostrados son datos corregidos teniendo en cuenta la atenuación introducida.

Para finalizar haremos un recuento de datos en la fibra tipo M-12, teniendo en cuenta su variación de potencia en el tiempo.

Dosis de Radiación (Gy)	Variación de Potencia (dB)	Tiempo de estabilización (Horas)	Pendiente aproximada (dB/Hora)
0	0	0	0
150	2,2	7	0.31
350	8	10	0.8
750	13	12	1.083

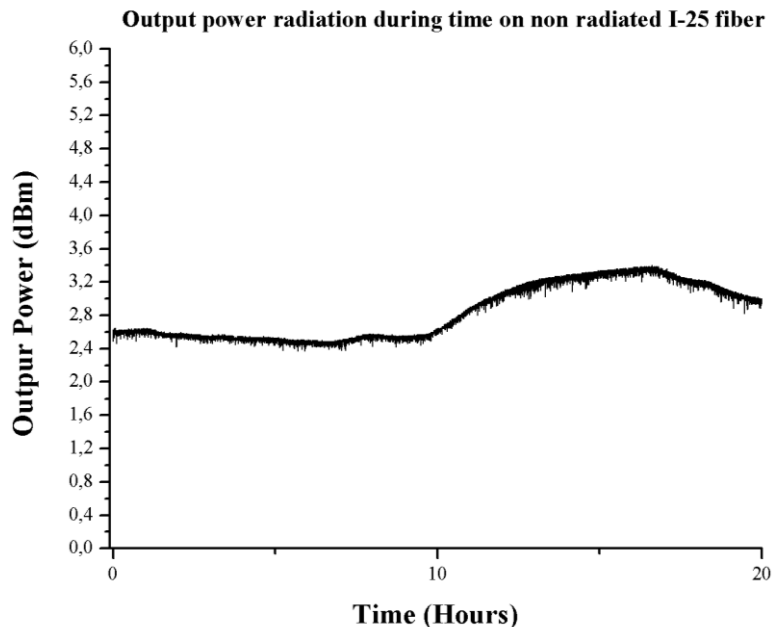
Como se puede observar en la tabla anterior, a medida que la dosis de radiación aumenta, la pendiente de estabilización aumenta de manera proporcional. En este caso, la potencia de bombeo utilizada en el caso de la fibra M-12 radiada con 750 Gy es de 250 mW.

#### 2.4.2 Medidas en I-25

Respecto a la fibra I-25, y como se mostrará más adelante en el apartado de medida de la emisión espontánea amplificada (ASE), hay que considerar que tiene una menor amplificación a la misma potencia de bombeo utilizada en el estudio de variación con tiempo, 100 mW. Debido a esto, las fibras con más radiación, las de 750 y 1000 Gy, no han generado emisión de espectro hasta bombearlas con una potencia mayor del doble de la utilizada en estos casos,

donde el bombeo fue de 200 mA (lo que se corresponde con unos 100 mW). De todas formas, no se incluirán en este estudio por esta condición.

Comenzaremos por ver la gráfica de evolución en el tiempo de la potencia de salida óptica para la fibra de referencia, la no radiada, para ver su gran diferencia a las demás.



*Figura 2.12: Variación de la potencia de salida a lo largo del tiempo utilizando una fibra I-25 no radiada*

Para el caso de una fibra no radiada de tipo I-25 (Figura 2.12), tenemos una pequeña pendiente de en la variación potencia al comienzo del estudio, diferenciándola del resto de fibras que han sido radiadas. También es necesario comentar que, debido a las condiciones de medida, las cuales han sido las mismas que con la fibra M-12, la variación de la potencia de salida a partir de la hora décima es debido a la variación de temperatura en el FBG.

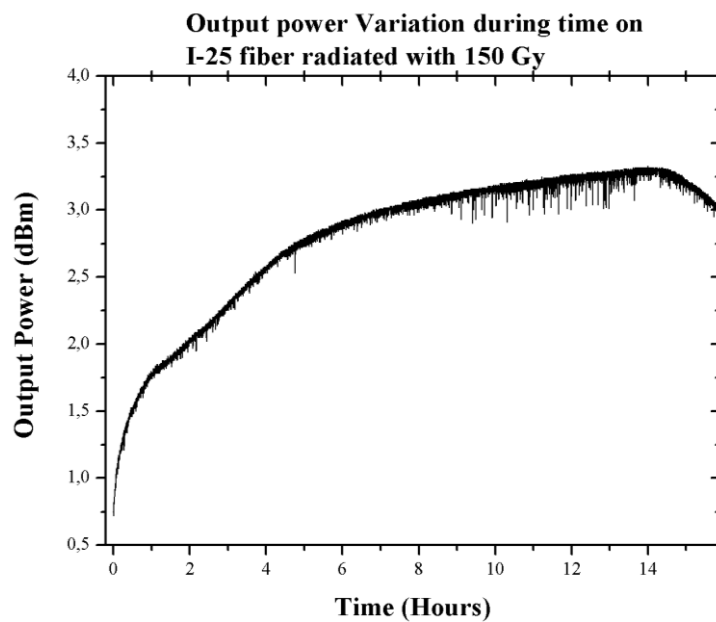


Figura 2.13: Variación de la potencia de salida a lo largo del tiempo utilizando una fibra I-25 radiada con 150 Gy y bombeada con 250 mA

Para el primer caso de fibra radiada del tipo I-25, 150 Gy (Figura 2.13), se puede observar una variación de potencia durante mayor tiempo, alcanzando la estabilidad tras unas 8 horas de estudio y con una variación total de potencia de 2,5 dB.

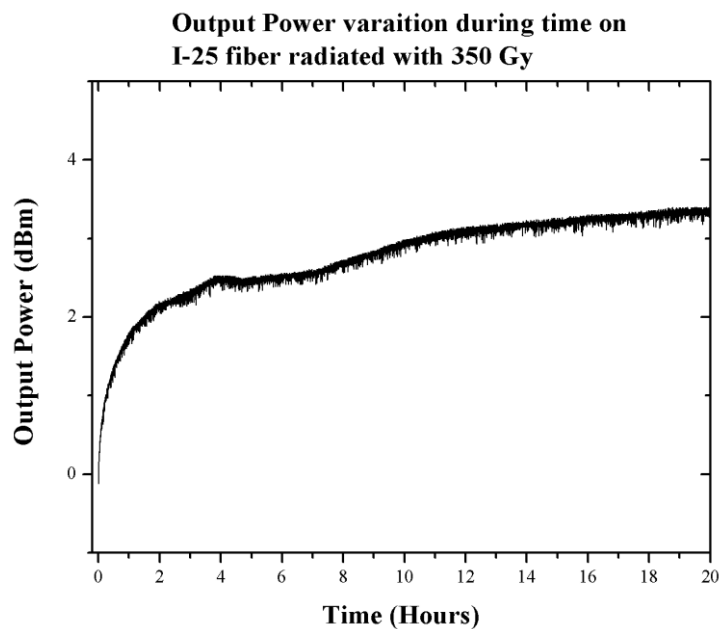


Figura 2.14: Variación de la potencia de salida a lo largo del tiempo utilizando una fibra I-25 radiada con 350 Gy y bombeada con 100 mW.

Para el siguiente caso observado en la Figura 2.14, se estudia la evolución temporal de la potencia de salida de un láser generado con una *EDF* radiada con una dosis de 350 Gy en la fibra I-25. Se puede observar el aumento de la variación de potencia en la misma escala de tiempo. Estas dos pendientes van a ser comparadas a continuación.

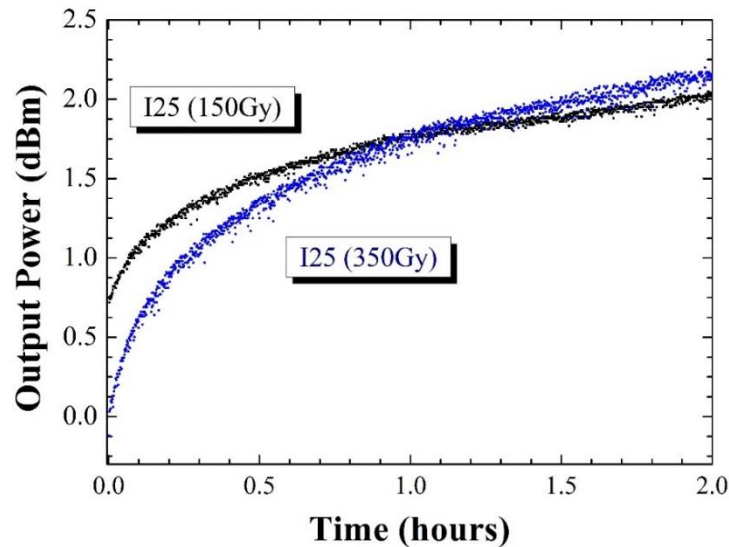


Figura 2.15: Comparación de las pendientes en la fibra I-25

Comparando las dos pendientes (Figura 2.15), se puede observar una diferencia entre pendientes mucho más moderada que para el caso de la fibra M-12. Sin embargo, en los dos casos el resumen es el mismo. Para la misma escala de tiempo estudiada, la potencia de salida al empezar a aplicar bombeo en las fibras más radiadas es menor y la pendiente de subida para el caso de más radiación siempre es mayor.

Por ultimo compararemos el espectro en potencia de salida de la fibra estudiada anteriormente, la I-25, cuando ha sido radiada con 350 Gy en diferentes momentos de su estudio, fijando como puntos a comparar los situados en 0 horas y 60 horas para poder ver la diferencia.

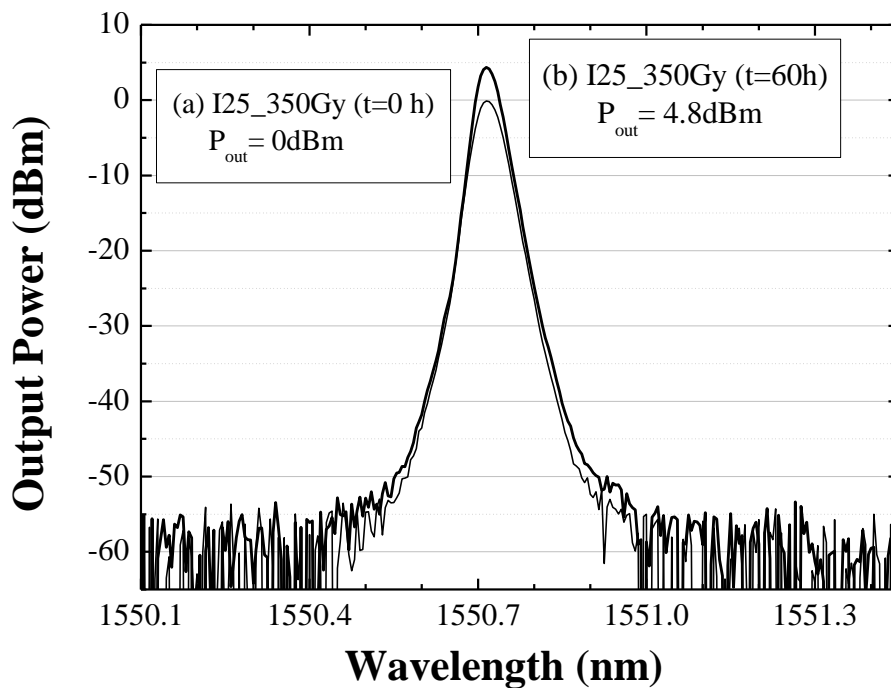


Figura 2.16: Comparación del espectro en potencia de la fibra I-25 radiada con 350 Gy: (a) habiendo transcurrido 0 horas y (b) habiendo transcurrido 60 horas.

En la comparación de espectro en potencia transcurrido un tiempo (Figura 2.16), podemos observar la diferencia ocasionada en el espectro de emisión de nuestro láser en anillo. Se puede observar que la diferencia de potencia de picos es de 4 dB, apreciándose una relación señal a ruido óptica (OSNR) de 55 dB para el caso de 0 horas y de 60 dB para el caso de 60 horas. Por último, remarcar la estabilidad del sistema en términos de longitud de onda, las cuales no han variado ni debido al tiempo ni a al tipo de fibra radiada.

Por último y a modo de resumen se van a analizar las variaciones de potencia en los tres casos estudiados de fibra tipo I-25.

Dosis de Radiación (Gy)	Variación de Potencia (dB)	Tiempo de estabilización (Horas)	Pendiente aproximada (dB/Hora)
0	0	0	0
150	2,5	8	0,31
350	3,3	10	0,33

En la anterior tabla se puede observar que, para una fibra tipo I-25, la cuestión de las pendientes es más igualitaria. Esto es debido a su menor respuesta a la

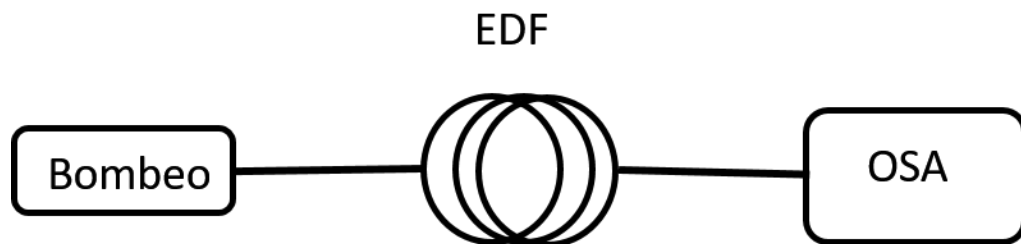


potencia de bombeo utilizada, 100 mW, como ya se explicará más tarde en la sección de medidas de emisión espontánea amplificada (ASE).

## 2.5 Medidas de emisión espontánea amplificada (ASE)

Cuando una fibra óptica dopada, en este caso con erbio, no se le introduce ninguna señal a amplificar, pero si se le introduce bombeo, genera lo que conocemos como emisión espontánea amplificada (ASE). La medición del espectro de emisión espontánea es una forma muy útil de caracterizar la ganancia disponible en función de la potencia de bombeo utilizada.

Para la medida de la emisión espontánea amplificada, se ha realizado un montaje sencillo que consiste en medir directamente el espectro de potencia a la salida de la fibra dopada cuando esta está siendo bombeada por una fuente de bombeo (Figura 2.18), en nuestro caso, centrada a 977nm para diferentes potencias de bombeo, expresadas en corriente de alimentación (mA). La responsividad de nuestro láser de bombeo es de 0.5W/A, así, por ejemplo, 100 mA de corriente de alimentación serán 50mW de potencia óptica de salida.



*Figura 2.17: Montaje experimental para la medida de ASE.*

### 2.5.1 ASE en M12

Ya que nuestro objetivo es obtener una relación directa entre radiación y potencia generada por la fibra dopada, no se expondrán los datos de todos los casos estudiados, ya que, en este caso, son siete (0 Gy, 150 Gy, 200 Gy, 350 Gy, 500 Gy, 750 Gy, 1000 Gy), sino mostrando los casos más interesantes de estudio.

Comenzaremos por analizar la emisión espontánea en la fibra de referencia:

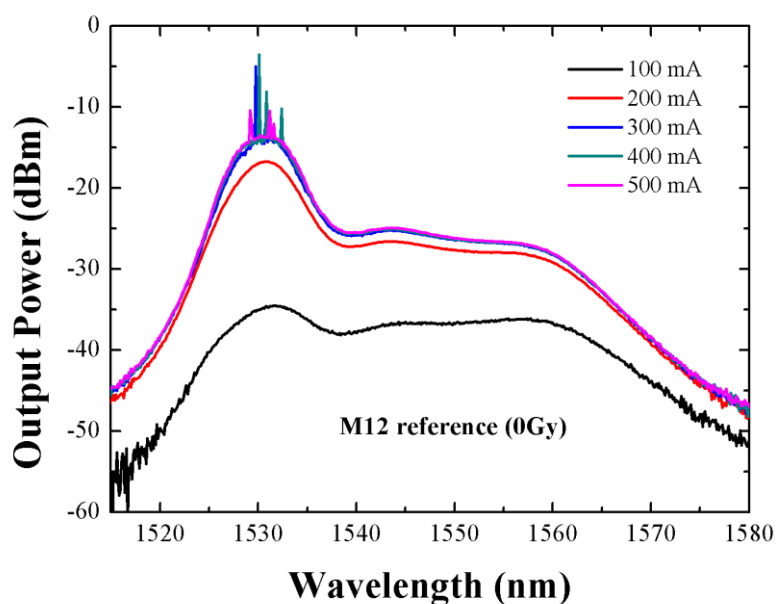


Figura 2.18: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra M-12 sin radiar.

En vista de la potencia de salida medida (Figura 2.18), se puede observar una pequeña variación de la emisión espontánea amplificada en función de la potencia de bombeo, puesto que, a partir del valor utilizado en la mayoría de mediciones de la potencia de salida a lo largo del tiempo, 200 mA (100 mW), apenas varía en potencia.

A continuación, se expondrán los ASE de las fibras radiadas, en orden creciente de radiación:

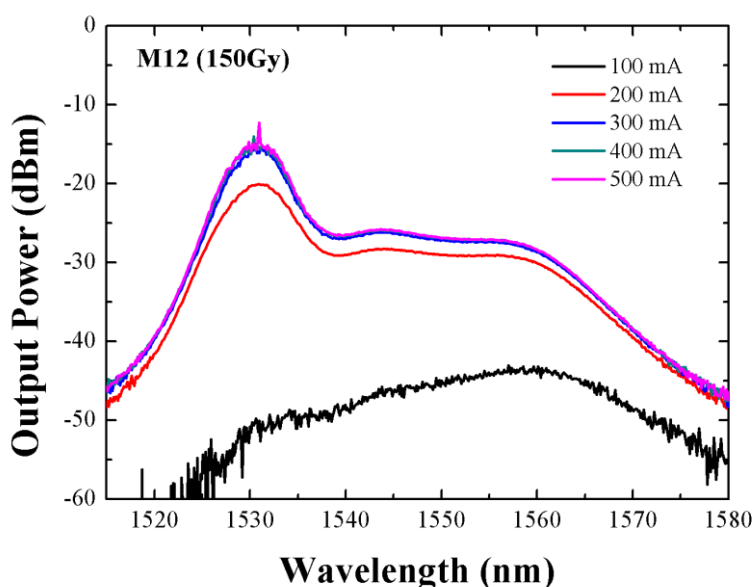


Figura 2.19: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra M-12 radiada con 150 Gy.

En la primera de ellas, la menos radiada con 150 Gy (Figura 2.19), se puede observar la misma variación citada en la fibra de referencia, sin embargo, el máximo en 1530 nm ha disminuido 5 dB.

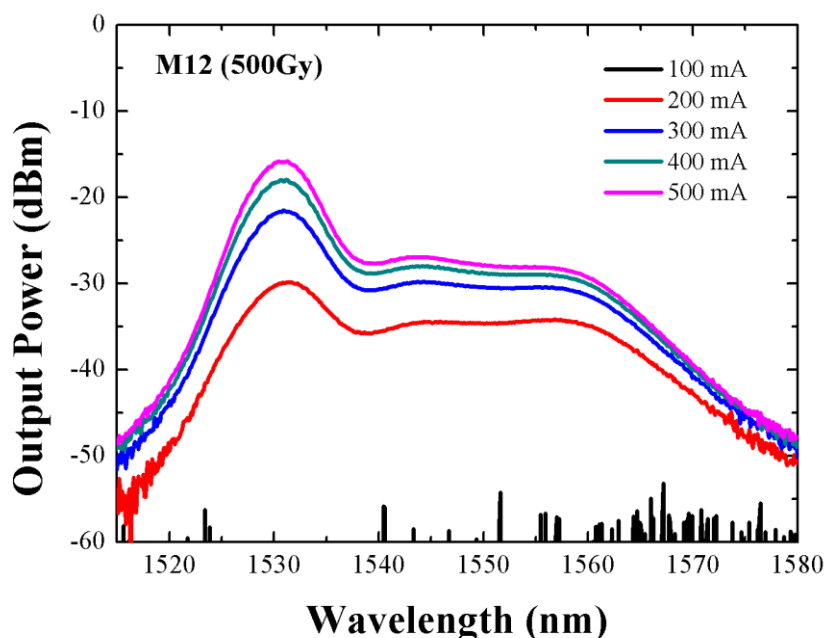


Figura 2.20: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra M-12 radiada con 500 Gy.

Dando el paso ya las fibras altamente radiadas, en este caso con 500 Gy mediante la medida plasmada en la Figura 2.20, se puede observar como la atenuación inherente a la radiación se hace notar. Han desaparecido los picos en 1530 nm y a la potencia normal de trabajo, 100 mW, la potencia a la salida ha disminuido 10 dBm. En este caso, ni siquiera reacciona a la mínima potencia de bombeo utilizada, que fue de 50 mW.

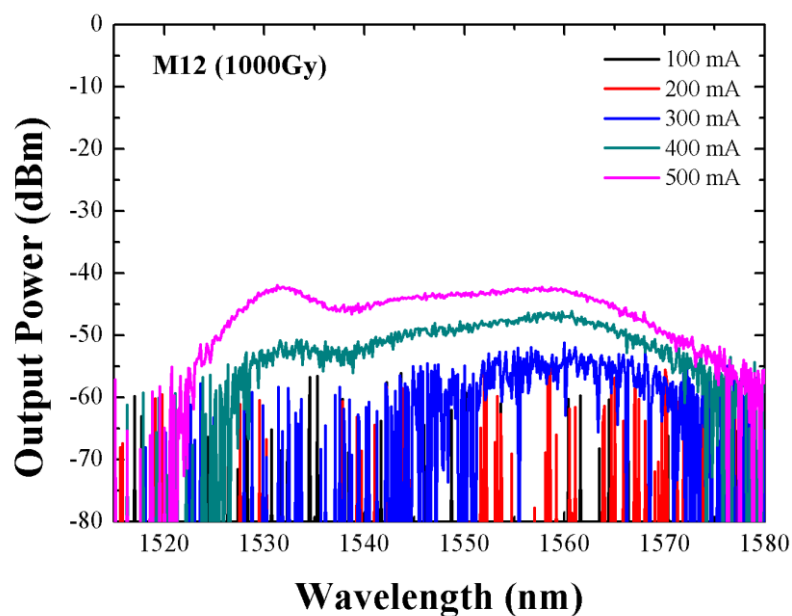


Figura 2.21: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra M-12 radiada con 1000 Gy.

Por último, en la Figura 2.21 se muestra el ASE de la fibra de mayor radiación estudiada dentro de las tipo M-12, que son 1000 Gy. Se puede observar su nula respuesta a menos de 300 mW, siendo cualquier medida inferior a -60 dBm de origen ruidoso. Cabe destacar, que la diferencia a máxima potencia respecto a la fibra de referencia sin radiar es del orden de 30 dB.

Para finalizar, mostraremos una gráfica en la que se muestran los diferentes tipos de ASE medido todos con una potencia de emisión de 100 mW, que ha sido la utilizada para realizar las medidas a lo largo del tiempo.

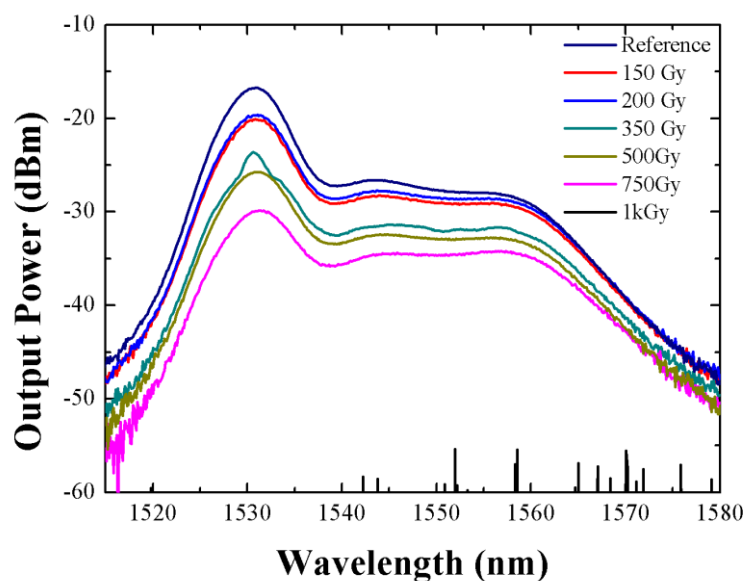


Figura 2.22: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra M-12 bombeada con 100 mW

En esta gráfica (Figura 2.22), la más esclarecedora en cuanto a la dependencia del ASE respecto a la radiación, se pueden observar, fijándonos en la respuesta alrededor de 1530 nm, como las separaciones entre diferentes radiaciones son casi proporcionales, habiendo poca diferencia en la comparación de 750 Gy con 500 Gy y 500 Gy con 250 Gy.

Para finalizar resumiremos los datos obtenidos en una tabla, reflejando la potencia en los dos puntos de interés del ASE, 1550 y 1530 nm, y su relación con la dosis de radiación recibida cuando están siendo bombeados con una potencia de 100 mW (125 mW para el caso de 150 Gy).

Dosis recibida (Gy)	Potencia en 1530 nm (dBm)	Potencia en 1550 nm (dBm)
0	-17	-27
150	-20	-27.5
200	-20	-28
350	-24	-31
500	-26	-32.5
750	-30	-35
1000	-60	-60

Estos datos nos muestran una evolución casi lineal de la potencia de salida en función de la dosis de radiación recibida, siendo excepcional el caso de 1000 Gy, puesto que ni siquiera genera respuesta a la potencia de bombeo de 100 mW.

Podemos concluir, por tanto, que la emisión espontánea en el caso de la fibra dopada de erbio del tipo M12 está estrechamente ligada a la radiación recibida, siendo esta emisión muy dependiente de la radiación.

### 2.5.2 ASE en I-25

A continuación, se mostrarán las medidas tomadas en la fibra dopada con erbio tipo I-25. Como ya se ha dicho antes, esta fibra presenta una ganancia diferente de la que habitualmente encontramos en las EDFs. Nos centraremos en los mismos aspectos que en el caso de la M-12.

Comenzaremos mostrando el espectro de emisión espontánea de la fibra no radiada de referencia.

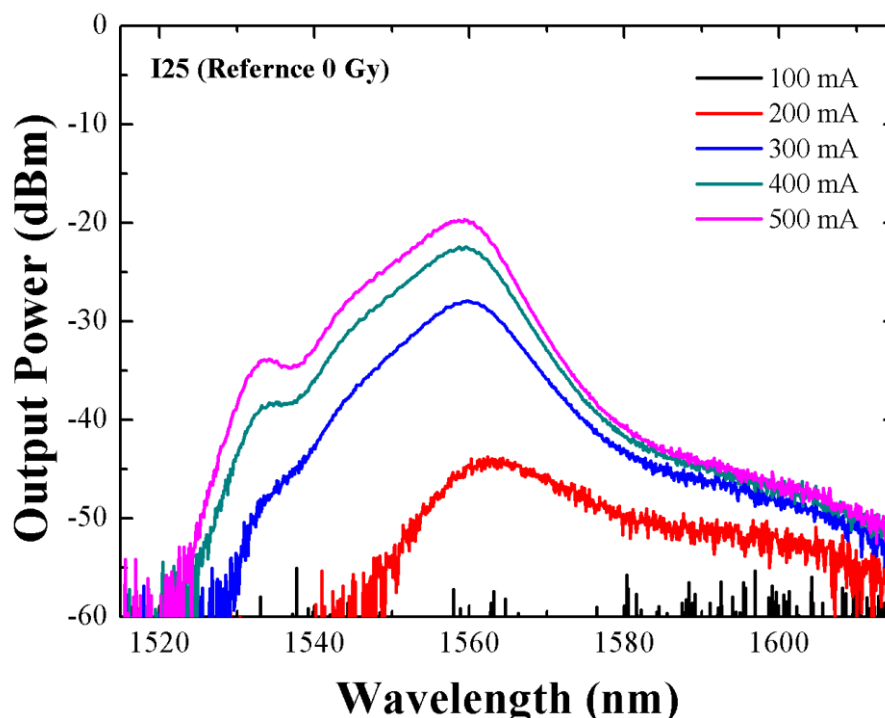


Figura 2.23: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra I-25 sin radiar.

En la medida del ASE de la fibra I-25 sin radiar (Figura 2.23), podemos observar que la forma de la campana es totalmente diferente de la M12, además,

tiene menor potencia de emisión con la misma potencia de bombeo que la M-12, no llegando a alcanzar el nivel de emisión en este caso la más radiada de ellas. A diferencia de la M-12, ésta si presenta una clara dependencia de la potencia de bombeo, lo cual nos indica que quizá todavía no hemos llegado a la potencia máxima de bombeo en la que se saturaría.

Ahora procederemos con las fibras radiadas. Al igual que con la M-12, no mostraremos todos los datos obtenidos de todas, sólo los más relevantes.

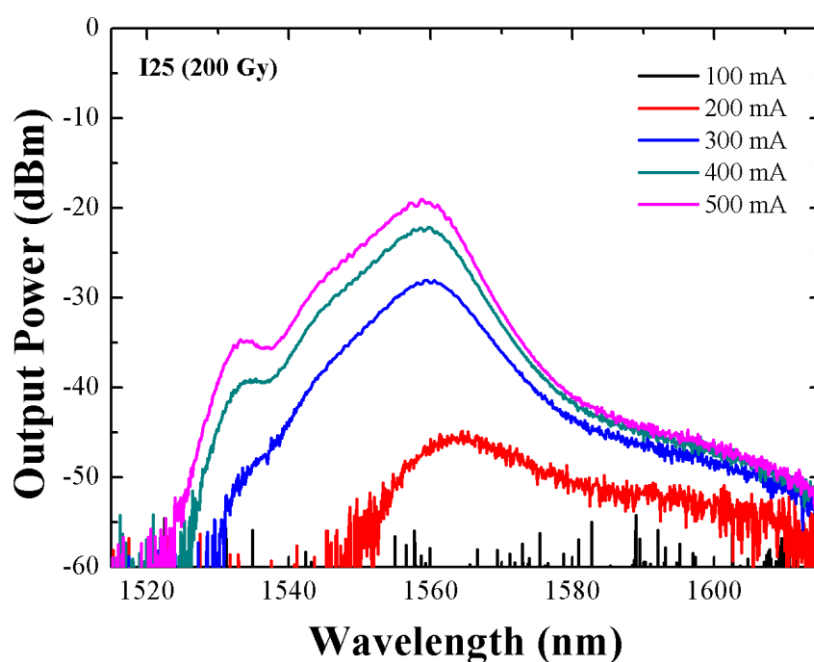


Figura 2.24: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra I-25 radiada con 200 Gy

Para las medidas del ASE en la fibra I-25 radiada con 200 Gy (Figura 2.24), apenas tenemos espectro de emisión con una potencia de bombeo de 100 mW, y siendo esta respuesta muy ruidosa, mientras que a partir de 300 mA (150 mW), su respuesta es muy similar a la de referencia no radiada.

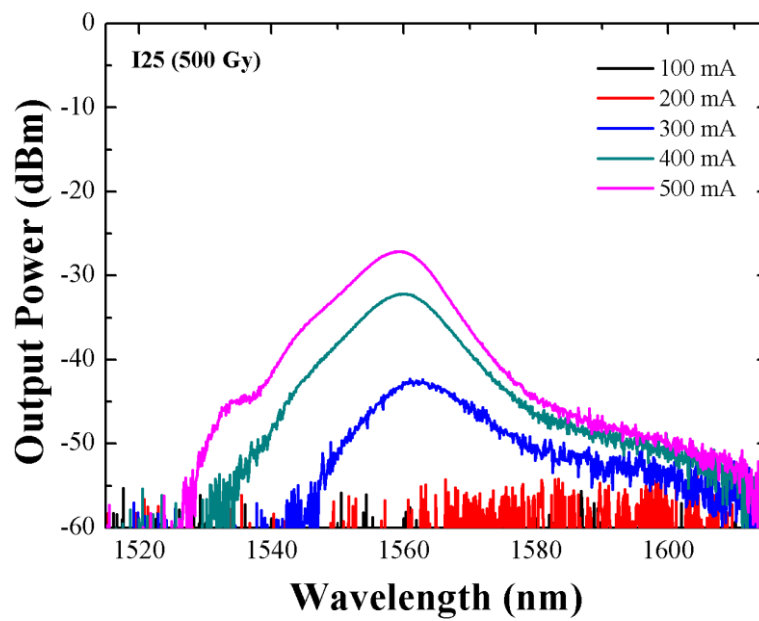


Figura 2.25: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra I-25 radiada con 500 Gy.

Para el siguiente caso, en la fibra radiada con 500 Gy (Figura 2.25), la curva de respuesta a 200 mA de bombeo ni siquiera aparece, y las demás sufren una caída de alrededor de 10 dB para el caso de mayor potencia y de más de 15 dB para el caso de 300 mA.

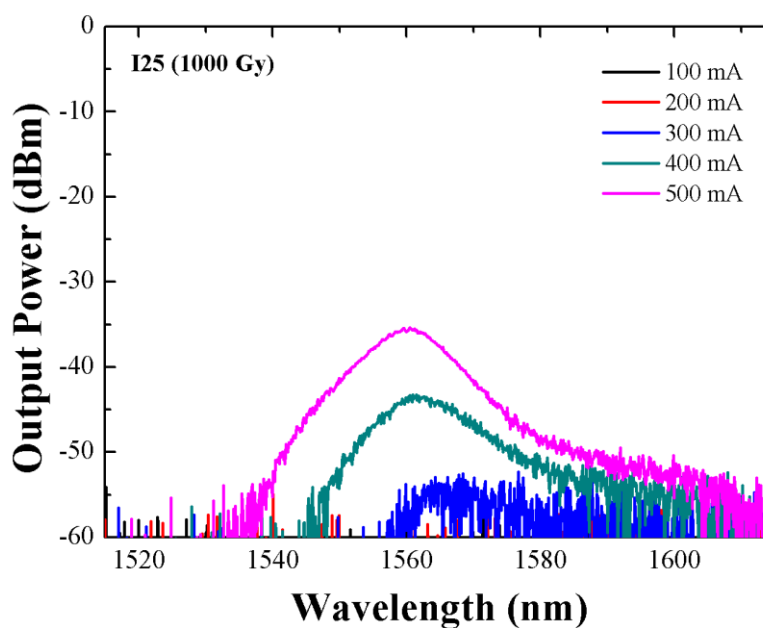


Figura 2.26: Emisión espontánea amplificada (ASE) en la fibra I-25 radiada con 1000 Gy.



Por último, la fibra que ha sido sometida a una radiación de 1000 Gy (Figura 2.26), carece de respuesta estable a menos de 200 mA, siendo ésta última de unos -55 dBm, despreciable respecto al ruido, que es del orden de -60 dBm. Se observa que la variación a potencia máxima respecto a la anterior fibra radiada con 500 Gy es de -10 dB, y respecto a la primera de ella, la fibra sin radiar, es de -15 dB.

Para finalizar el estudio de ASE de la fibra I-25, analizaremos la potencia en 1560 nm, su pico de emisión espontánea amplificada, en función de la dosis de radiación recibida.

Dosis recibida (gY)	Potencia en 1560 nm (dBm)
0	-41
150	-45
200	-46
500	-60
750	-60
1000	-60

Para el caso de la fibra I-25, y a la vista de los datos resumidos en esta tabla, podemos concluir que la evolución de la potencia en el pico de emisión espontánea amplificada es también función de la dosis de radiación recibida, sin embargo, a una potencia de 100 mW de bombeo, a partir de 500 Gy la respuesta no es suficiente para diferenciarse del ruido, lo cual nos indica que para trabajar con esta fibra quizá es necesaria una mayor potencia de bombeo.

Analizaremos ahora estos mismos datos con una potencia de bombeo de 250 mW:

Dosis recibida (gY)	Potencia en 1560 nm (dBm)
0	-16
150	-18
200	-20
500	-26
750	-28
1000	-35

A la vista de los resultados queda probado que a mayor potencia de bombeo (250 mW), la proporcionalidad rige la evolución de la potencia de salida en torno a 1560 nm.

## 2.6 Medidas mediante un OBR

Por último, se han caracterizado los dos tipos de fibras mediante la medición de su atenuación a lo largo de la fibra a través de un *Optical Backscattering Reflectometer (OBR)*, un instrumento que mide la reflexión en cada punto de la fibra.

Para ello, el OBR utilizado ha sido el LUNA 4600, con una resolución de 10  $\mu\text{m}$ . Si bien puede parecer una característica poco importante en nuestro caso, puesto que no vamos a analizar pequeñas longitudes de fibra, ésta resolución es una de las más altas de mercado, lo cual proporciona una resolución espacial más que suficiente para nuestras medidas.

El método de medida con este aparato es sencillo: después de calibrar el láser del OBR con una fibra referencial, solo resta conectar la fibra a medir. Es recomendable colocar un espejo al otro extremo de la fibra, que puede ser realizado simplemente con un circulador, lo que mejoraría nuestras medidas.

Las diferentes fibras han sido conectadas al reflectómetro de la marca LUNA a través de cables ópticos de 2m de longitud y con conectores SMF.

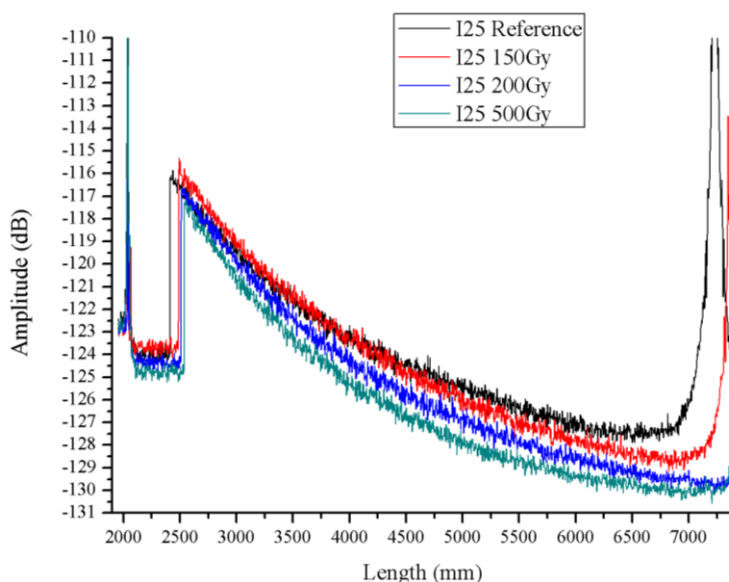


Figura 2.27: Valores de backscattering para la fibra I-25 en función de la dosis de radiación.

Para el caso de la fibra I-25 (Figura 2.27), se pueden observar varios puntos importantes tener en cuenta. El primero de ellos se sitúa, de la misma forma que hará en la fibra M-12, en 2 metros. Este es el punto de conexión de nuestra fibra, con el latiguillo que viene desde el *OBR*, el siguiente punto es el cercano a 2,5 metros, diferente para cada una de ellas, debido a que este es el punto de soldadura en el que se han unido las fibras y los conectores.

A partir de aquí, es decir, en la distancia de unos 2.5 metros, encontramos a nuestra fibra a evaluar. Se puede observar una clara dependencia de la radiación, partiendo todas ellas del mismo punto y con diferentes pendientes en función de la radiación recibida.

El último punto importante es el pico cercano a los 7 metros, el cual nos indica el final de nuestra fibra.

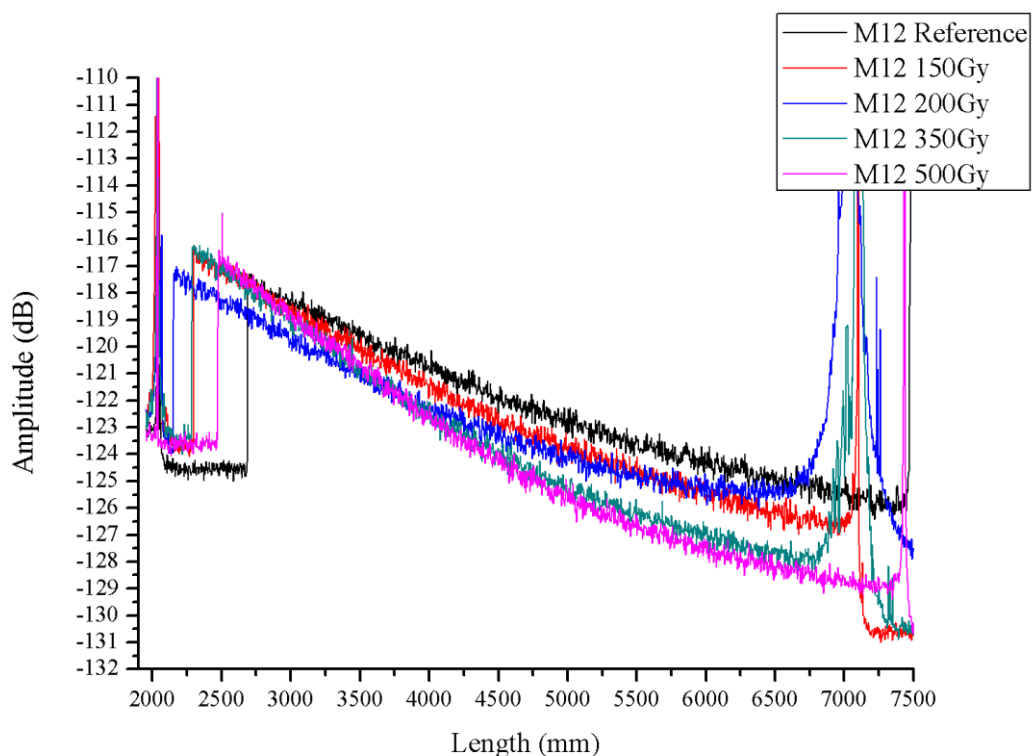


Figura 2.28: Valores de backscattering para la fibra M-12 en función de la dosis de radiación.

Para el caso de la M-12 (Figura 2.28), se pueden observar los mismos puntos antes citados en 2000, 2500 y 7000 mm, correspondientes a conectores y al final de la fibra. En este caso las pendientes son menos abruptas, diferenciándose también de forma proporcional a la dosis recibida.

En la siguiente tabla se muestran los datos de *backscattering* evaluados al comienzo de la fibra, un punto cercano a los 3 metros, y en otro punto al final de la fibra, en este caso evaluados en 6.5 metros.

Dosis de radiación (Gy)	Backscattering en la fibra tipo I-25 (dB)		Backscattering en la fibra tipo M-12 (dB)	
	3 metros	6.5 metros	3 metros	6.5 metros
0	-121,48	-127,44	-119,42	-124,83
150	-121,9	-128,25	-120,16	-126,04
200	-122,4	-129,36	-121,17	-126,77
350	-	-	-121,15	-127,60
500	-123,25	-130,10	-121,55	-128,27

La falta de datos de *backscattering* de la fibra tipo I-25 radiada con 350 Gy se debe a que la longitud de estudio era de 3,5m, y la comparación no hubiera tenido sentido en este caso.

Para el resto de ellas vemos una clara dependencia de la dosis de radiación recibida. Esta dependencia, que se traduce en una diferencia numérica, se acrecienta según nos vamos acercando al final de la fibra que se está estudiando.

## 2.8 Análisis de resultados.

Ha quedado probado que tanto el método de la evolución de potencia como el de la medida de la emisión espontánea amplificada (ASE) son válidos para evaluar la radiación recibida en una fibra óptica dopada de Erblio.

Respecto a las medidas de variación de potencia óptica a la salida a lo largo del tiempo se puede concluir que, a mayor dosis de radiación recibida, la potencia óptica al inicio de los estudios es menor, y tanto el tiempo de estabilización como la variación total de potencia óptica hasta la estabilización son mayores.

Por la parte de la respuesta a la potencia de bombeo sin estar dentro de una cavidad láser, es decir, el estudio respecto a la emisión espontánea amplificada, los resultados son claros respecto a la proporcionalidad directa: a mayor dosis de radiación recibida menor potencia en el espectro de emisión

espontánea, llegando casos en los que esta potencia de emisión espontánea era nula.

Por último, en el estudio realizado con el reflectómetro LUNA (*OBR*), también se aprecia una correspondencia entre la atenuación inducida por la radiación (*RIA*) y la dosis de radiación en las fibras estudiadas.

Sin embargo, se distinguen dos respuestas diferentes en función del tipo de fibra: la tipo M-12 es más sensible a valores de poca potencia y poca radiación, mientras que los resultados del estudio de *ASE* de la I-25 indican que esta fibra podría servir también para mayores radiaciones todavía.

## 3- Implementación de un láser random utilizando DCF

### 3.1 Introducción

Los *láseres random* son láseres que utilizan como base para la emisión la retro-dispersión distribuida realizada por uno o varios medios presentes en el sistema. Estos medios son típicamente materiales o medios activos con una gran cantidad de impurezas, las cuales son las responsables de la emisión de fotones en localizaciones aleatorias, aunque estables.

Esta implementación se lleva a cabo sin necesidad de una cavidad puntual [7], sino distribuida a lo largo de la fibra. En este caso, se va a estudiar la posibilidad de realizar la implementación de un láser random mediante una cavidad láser lineal, utilizando un circulador como espejo y una fibra compensadora de dispersión como el segundo espejo distribuido.

Una fibra compensadora de dispersión (*DCF*, según sus siglas en inglés), es una fibra especialmente diseñada para tener un coeficiente de dispersión temporal en función de la longitud de onda inverso al de la fibra utilizada en el sistema de transmisión. El propósito de esta inversión es la de compensar la dispersión, haciéndola, en el caso ideal, nula. Las fibras compensadoras de dispersión suelen tener un área efectiva muy reducida, lo que acentúa los efectos no lineales y la retro-dispersión.

### 3.2 Método de estudio

Para el estudio de la posible implementación de un láser random basado en el scattering de una DCF se estudiará la emisión en tres montajes diferentes, usando en cada uno de ellos fibras compensadoras de dispersión de la misma longitud y tipo, pero estudiando dos casos en este sentido; una de las fibras ha sido radiada con motivo de estudiar las diferencias provocadas por la radiación en la reflexión.

Como medio activo se ha planteado el uso de una fibra dopada con erbio tipo M-12. Esta fibra estará siendo bombeada en todos los casos con 250 mW de potencia.

### 3.3 Montajes experimentales y medidas realizadas

Como ya se ha explicado antes, se han realizado tres montajes diferentes para comprobar el funcionamiento de una fibra de compensación de dispersión para su uso en un sistema de láser random.

En este apartado se identificarán los componentes utilizados y los resultados obtenidos.

#### 3.3.1 Cavidad lineal con un láser de bombeo

En el primero de los casos se ha optado por un láser lineal de fibra óptica, conformado por dos espejos, uno de ellos distribuido, y un medio activo en el medio de estos dos espejos.

El primer espejo ha sido implementado mediante un circulador con un atenuador variable. El segundo espejo ha sido implementado mediante la fibra compensadora de dispersión (*DCF*) a estudiar de 2.5 km de longitud, finalizando el otro punto de la bobina en un gel adaptador de índice para evitar posibles reflexiones. Éste método se utilizará en los tres montajes.

Como medio activo se ha utilizado la fibra M-12 a la que se le ha inducido una potencia de bombeo de 250 mW mediante un WDM.

Para extraer la potencia del láser en línea se ha utilizado un acoplador 90:10 mediante el cual el 10% de la señal óptica es visualizada mediante un OSA. Se ha optado por el uso del mismo OSA que en el caso anterior, el MS9740A de Anritsu America, con una configuración de resolución de 0.05 nm y una cantidad de puntos muestreados de 2001. En la siguiente figura se puede observar el montaje de forma gráfica.

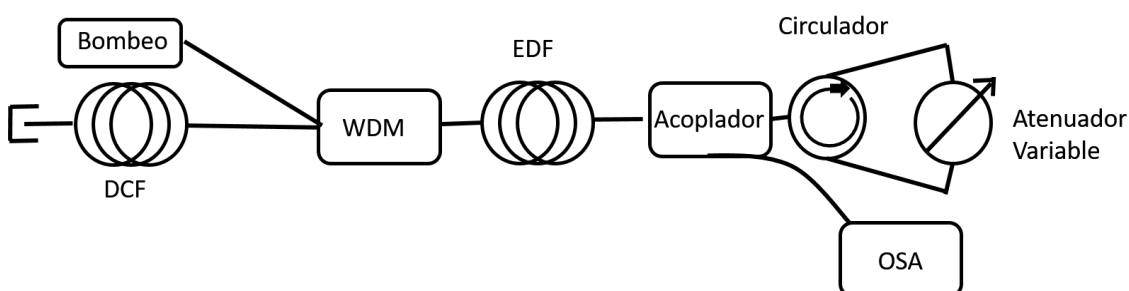
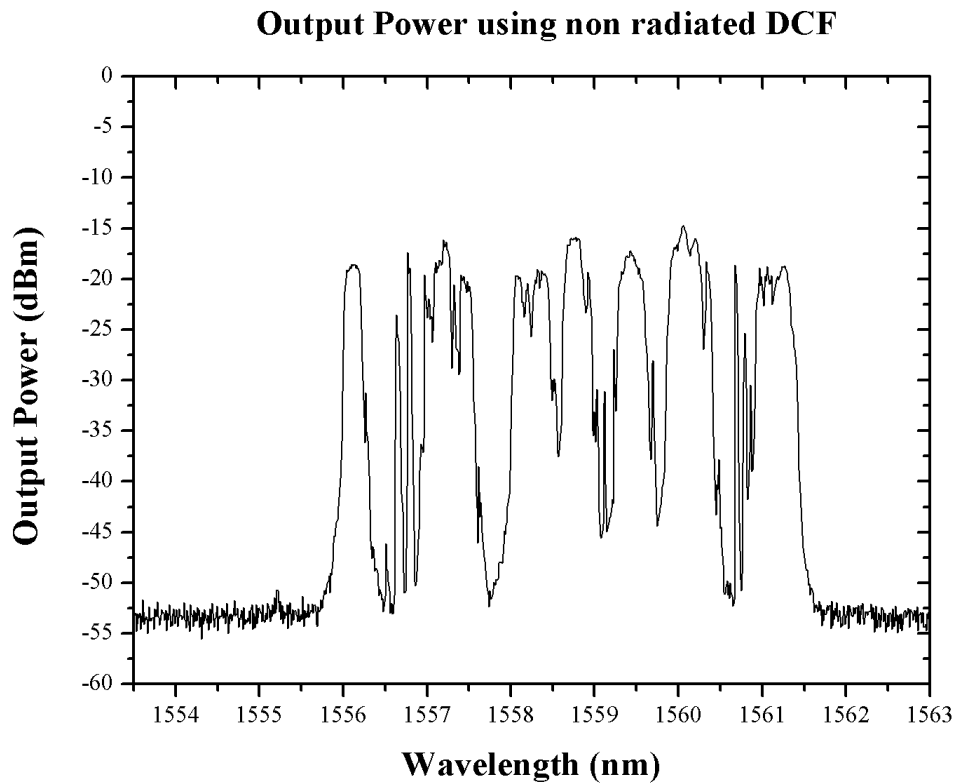


Figura 3.1: Montaje de la cavidad láser en configuración lineal con un espejo distribuido mediante el uso de 2.5 km de DCF

Ahora observaremos la potencia recibida por el OSA, proveniente del 10% de la potencia en el espejo.



*Figura 3.2: Espectro de emisión para una DCF no radiada utilizando el primero de los montajes.*

En la Figura 3.2 se muestra el espectro de emisión para una DCF utilizando una cavidad lineal con solo una fuente de bombeo. Podemos observar picos cercanos al nanómetro de anchura, con una potencia que ronda en casi todos los picos los -17 dBm. Vemos que la anchura total desde el primer pico al último, lo que sería la anchura de nuestro láser random es de 6 nm para el caso de la fibra no radiada.



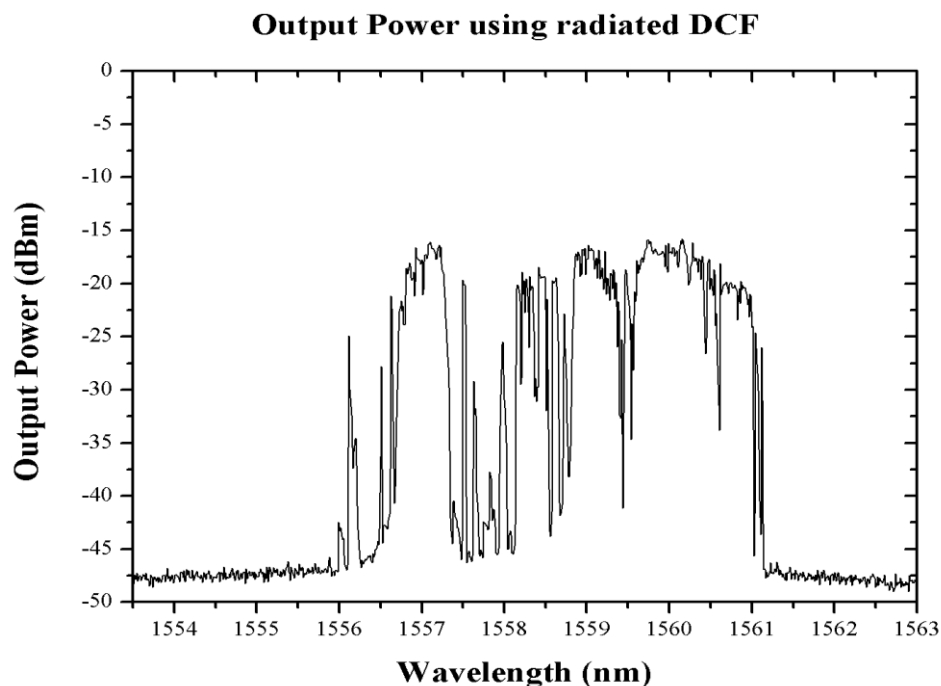


Figura 3.3: Espectro de emisión para una DCF radiada utilizando el primero de los montajes.

Para el caso de la emisión de la DCF radiada (Figura 3.3), tenemos un leve aumento de potencia, cerca de 2 dB, y una disminución de los niveles de potencia en los extremos de nuestra zona de emisión previa. Se produce un estrechamiento en los picos y un mayor agrupamiento en longitud de onda. Es decir, podemos decir que está más cerca de nuestro objetivo que el caso de la DCF no radiada.

### 3.3.2 Cavidad linear introduciendo un EDFA comercial

En esta propuesta se trata de diferenciar el camino de ida y vuelta en la cavidad. Para ello, se utiliza el mismo esquema de reflectores, uno con un circulador y atenuador y otro con la fibra compensadora de dispersión, pero después del medio activo, que sigue siendo fibra dopada de erbio tipo M-12 se implementa una bifurcación diferenciando camino de ida y vuelta.

Esta diferenciación se realiza mediante dos circuladores, uno a la salida del medio activo y otro a la entrada del segundo espejo. Esta bifurcación es necesaria debido a la no bidireccionalidad del EDFA y al aislador que se encuentra en su interior. El acoplador que extrae la potencia de la cavidad lineal en este caso se coloca en el camino de vuelta.

Este esquema se presenta en la figura 3.4.

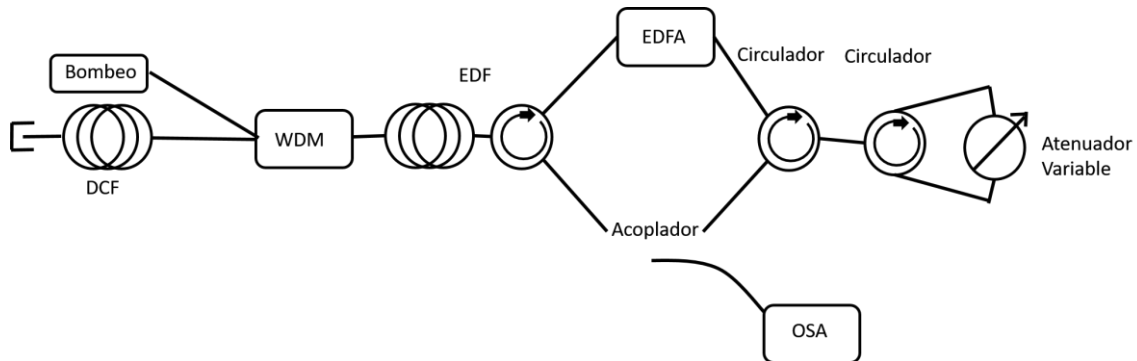


Figura 3.4: Segundo montaje realizado diferenciando camino de ida y vuelta y utilizando un EDFA

El EDFA usado ha sido el *C-Band +20 dB Amplifier* de la empresa *ManLight*, un amplificador en banda C que dispone de dos fuentes de bombeo internas, las cuales en todo momento han estado funcionando a 300 mA cada una.

Ahora analizaremos los resultados obtenidos comenzando por la fibra compensadora de dispersión no radiada.

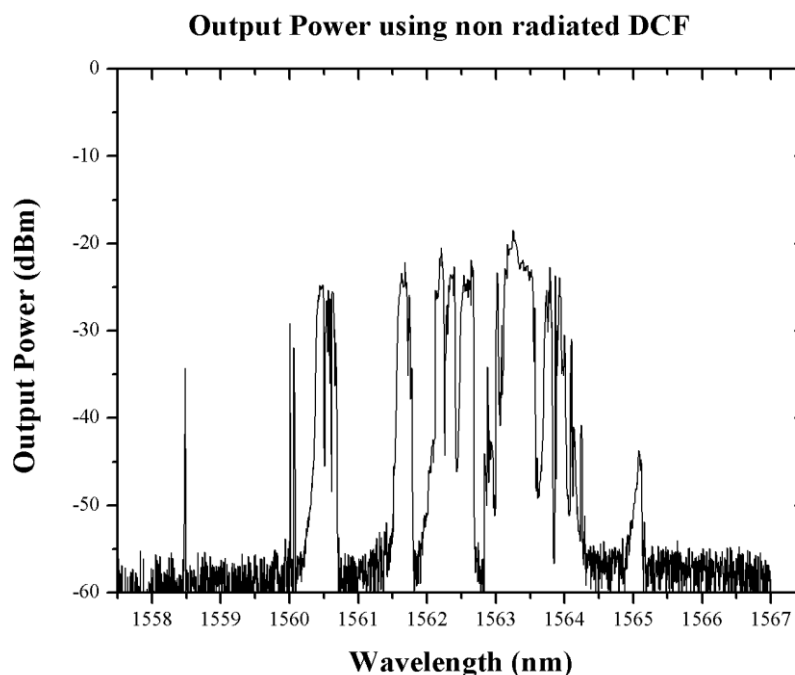


Figura 3.5: Espectro óptico de salida utilizando la DCF no radiada en el segundo montaje.

En este caso podemos observar como el ancho espectral de emisión se ha desplazado 3nm a la derecha. Podemos observar que tanto sus picos como

su anchura total son menores que en el primer caso analizado, no llegando ninguno a superar en ningún momento el límite de -20 dBm.

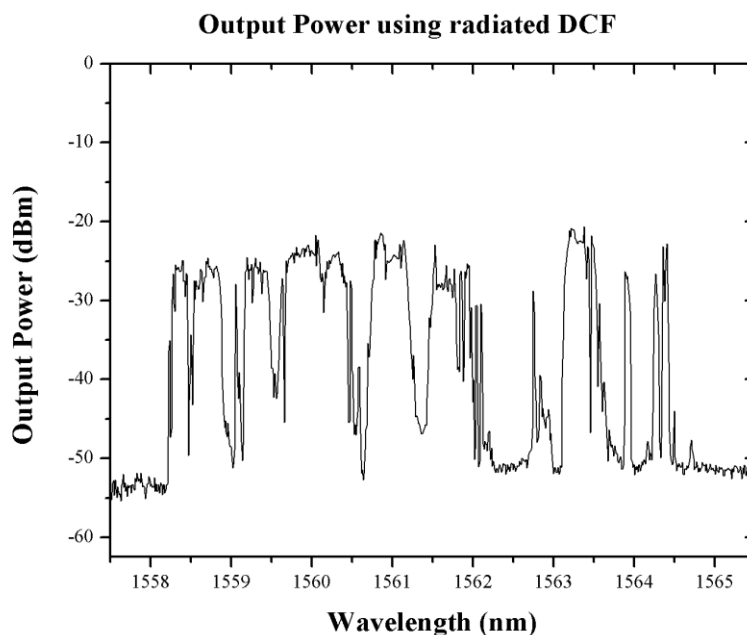


Figura 3.6: Espectro óptico de salida utilizando la DCF radiada en el segundo montaje.

En el caso del uso de la fibra no radiada (Figura 3.6), se aprecia una mejora sustancial en el agrupamiento de los diferentes picos generados por el scattering de nuestra DCF, sin embargo, la potencia disminuye en el orden de 2dB.

Volvemos a observar una mejora en el agrupamiento debido al uso de una fibra de compensación de dispersión radiada, pero la potencia está muy reducida debido a que el uso del EDFA aporta también una gran cantidad de ruido al sistema, y éste mismo ruido el que interviene en la amplificación estimulada debido a la naturaleza de retroalimentación de nuestro sistema.

### 3.3.3 Cavidad linear con doble fuente de bombeo

Por último, se plantea aumentar la potencia de bombeo mediante el uso de dos fuentes de bombeo, cada una de ellas acompañada de una fibra dopada con erbio tipo M-12 mediante un WDM y conectadas de forma consecutiva. Con esto lo que se busca es aumentar la cantidad de potencia de bombeo introducida.

Para ello se vuelve a utilizar como espejos puntual y distribuido el circulador con atenuador y la fibra DCF, respectivamente. El acoplador que extrae la potencia de la cavidad lineal se ha introducido a la entrada/salida del circulador.

Este esquema se presenta en la figura 3.7:

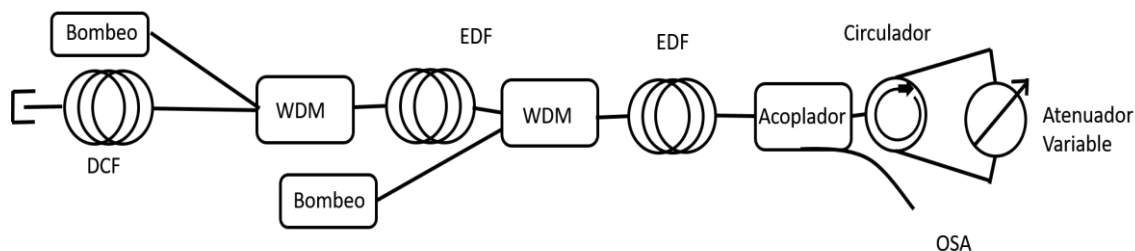


Figura 3.7: Tercer esquema de montaje, en el que se puede observar el doble bombeo utilizado

En este caso las dos fuentes de bombeo están funcionando a 250 mW, centradas en la longitud de onda 980 nm, y el acoplador sigue siendo del tipo 90:10.

A continuación, se mostrará el espectro de salida medido en el acoplador usando, en primera instancia, la fibra compensadora de dispersión no radiada.

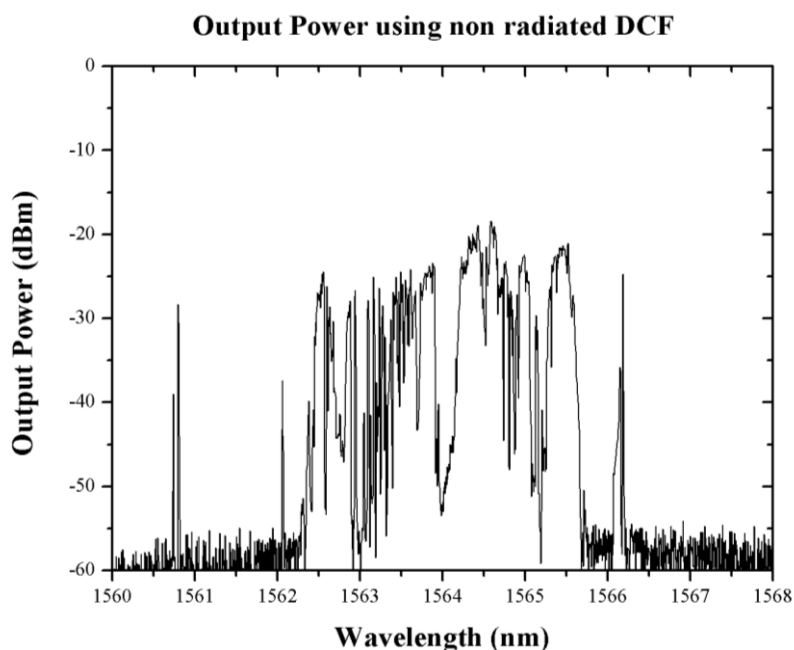


Figura 3.8: Espectro de salida utilizando la DCF no radiada en el tercer montaje.

Se puede observar cómo, en este caso, con una potencia de bombeo total de 500 mW, la emisión de potencia debido al efecto de scattering de la DCF ha variado su posición, presentando un primer pico de potencia en la longitud de onda de 1560,75 nm, para luego ver la agrupación más importante también desplazada, estando ésta entre 1562,35 y 1565,7 nm, con una potencia comprendida entre -25 y -20 dBm.

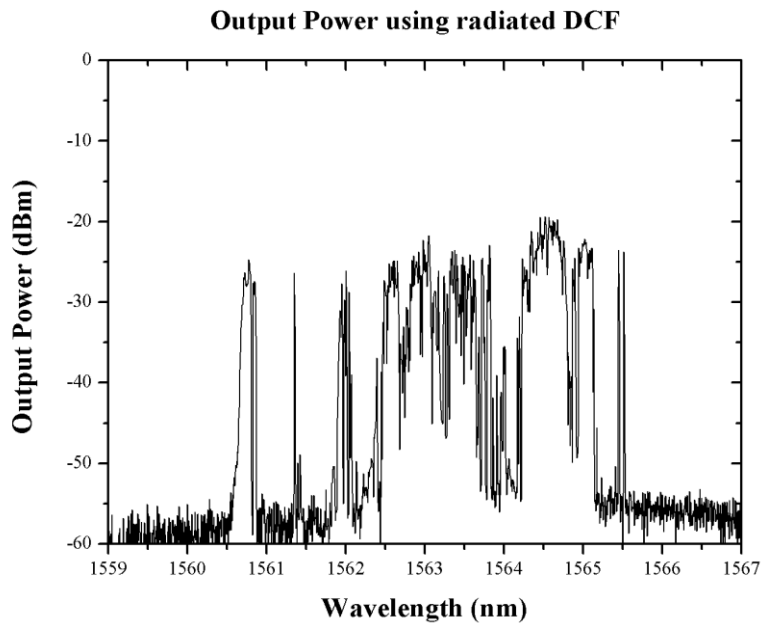


Figura 3.9: Espectro óptico de salida utilizando la DCF radiada en el tercer montaje.

En el último caso de estudio, el de la DCF radiada en una cavidad lineal con dos fuentes de bombeo (Figura 3.9), no se produce mucha mejora debido a la diferencia de radiación en la fibra que actúa como espejo, sin embargo, es, de todos los métodos estudiados, el que más cerca está de convertirse en un láser random.

En los extremos del espectro generado, tanto en términos de potencia como en longitud de onda las respuestas son similares a las observadas en el caso de la fibra no radiada utilizando este tercer montaje.

### 3.4 Análisis de resultados.

Como se ha podido observar, la cantidad de potencia bombeada al medio activo que forma parte de la cavidad lineal tiene una estrecha relación con la capacidad del sistema para agrupar las diferentes longitudes de potencia en un espectro de gran anchura, sin embargo, esta potencia necesaria no ha sido alcanzada ni con el tercer montaje, el cual tenía una potencia total de bombeo de 500 mW.

También ha quedado demostrada la mejor eficiencia del uso de una fibra compensadora de dispersión radiada frente al mismo tipo de fibra no radiada como espejo en la cavidad, proporcionando en los tres casos mejores resultados.

Así pues, la mejora producida por esta fibra compensadora de dispersión tiene la necesidad de ser estudiada en entornos y montajes experimentales con una potencia y amplificación óptica mayor que la estudiada, como sería el caso de una amplificación Raman, objetivo este que se plantea como línea futura de trabajo.

# Conclusiones y líneas futuras de estudio

Mediante los estudios realizados en el apartado de fibras ópticas dopadas con erbio y radiadas hemos podido concluir que existe una proporcionalidad directa entre la dosis de radiación recibida por la fibra y el tiempo de estabilización de la potencia de salida cuando esta fibra es utilizada como medio activo en una cavidad láser.

Esta proporcionalidad describe que cuanto mayor es la dosis de radiación, menor es la potencia de salida al inicio del estudio y mayores son tanto la variación de potencia hasta la estabilización como el tiempo de estabilización.

En la parte de las medidas de emisión espontánea amplificada y el estudio de estas fibras mediante un *OBR* también ha quedado clara una proporcionalidad directa con la dosis de radiación recibida.

Sin embargo, nuestro estudio sólo ha cubierto dos tipos de fibras dopadas con erbio, y ha llegado hasta los 1000 Gy. En el futuro, experimentos con más radiación y aún más tipos de fibras se deberán realizar para crear un modelo que permita crear sensores de radiación basados en láseres de fibra óptica fiables, estables y precisos.

Respecto a la implementación de un láser random utilizando como refractor una fibra compensadora de dispersión (*DCF*), nuestro estudio ha demostrado que no puede ser simplemente implementada sin añadir más potencia al montaje. Estudios utilizando mayor potencia y amplificación, por ejemplo, usando amplificación Raman, deberán ser cursados con el objetivo de implementar un láser random basado en una *DCF*.

# Bibliografía y referencias

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/atmos/raman.html>

[http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2\\_3\\_6.htm](http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_3_6.htm)

<https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/587/1/12251.pdf>

<http://slideplayer.com/slide/6292528/>

<https://www.thorlabs.co.jp/index.cfm>

<https://www.anritsu.com/en-US/test-measurement/products/ms9740a>

<http://www.photonics.byu.edu>

**[1]** Pérez-Herrera, R. A., Quintela, M. A., Fernández-Vallejo, M., Quintela, A., López-Amo, M., & López-Higuera, J. M. (2009). Stability comparison of two ring resonator structures for multiwavelength fiber lasers using highly doped Er-fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 27(14), 2563-2569.

**[2]** Snyder, G. J., Fleurial, J. P., Caillat, T., Yang, R., & Chen, G. (2002). Supercooling of Peltier cooler using a current pulse. *Journal of Applied Physics*, 92(3), 1564-1569.

**[3]** Pérez-Herrera, R. A., & López-Amo, M. (2011). Láseres de fibra óptica. Descripción y aplicaciones. *Mundo Electrónico*, (426), 36-42.

**[4]** Turitsyn, S. K., Babin, S. A., El-Taher, A. E., Harper, P., Churkin, D. V., Kablukov, S. I., ... & Podivilov, E. V. (2010). Random distributed feedback fibre laser. *Nature Photonics*, 4(4), 231.

**[5]** F. Mady, J.-B. Duchez, Y. Mebrouk, M. Benabdesselam, "Equilibrium Degradation Levels in Irradiated and Pumped Erbium-Doped Optical Fibers" *IEEE Transactions on Nuclear Science* 62(6), 7312516, pp. 2948-2955 (2015).

**[6]** P. Stajanca and K. Krebber, "Radiation-Induced Attenuation of Perfluorinated Polymer Optical Fibers for Radiation Monitoring," *Sensors* 17, Issue 9, Article number 1959, (2017).

**[7]** Cao, H., Zhao, Y. G., Ho, S. T., Seelig, E. W., Wang, Q. H., & Chang, R. P. H. (1999). Random laser action in semiconductor powder. *Physical Review Letters*, 82(11), 2278.